

CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA DE LEVITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA UTILIZANDO
SENSORES INFRARROJOS

Guillermo Alonso Granada Marín
Código: 1088299046

Jorge Andrés Valencia Garzón
Código: 1088300026

Universidad Tecnológica de Pereira
Facultad de Tecnología
Escuela de Tecnología Eléctrica
Pereira
2015

CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA DE LEVITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA UTILIZANDO SENSORES INFRARROJOS

Guillermo Alonso Granada Marín
Código: 1088299046

Jorge Andrés Valencia Garzón
Código: 1088300026

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Electricidad

Director
Ph.D. Antonio Escobar Zuluaga
Docente Programa de Tecnología Eléctrica

Universidad Tecnológica de Pereira
Facultad de Tecnología
Programa de Tecnología Eléctrica
Pereira
2015

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Contenido

1. CAPÍTULO 1. Introducción.....	9
1.1 Justificación.....	10
1.2 Estado del arte	11
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo general	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
2. CAPITULO 2. Conceptos fundamentales del campo magnético	14
2.1 Imanes	14
2.2 Fundamentos del electromagnetismo por André Marie Ampere:	16
2.3 Campo magnético creado por una corriente	16
2.4 Campo creado por una espira circular	17
2.5 Campo magnético producido por un solenoide.....	18
3. CAPITULO 3. Condición de equilibrio.....	19
3.1 Análisis electromagnético del sistema.....	20
3.2 Análisis de la dinámica del sistema.....	25
4. CAPITULO 4. Construcción de la plataforma de levitación y el actuador	27
4.1 Construcción de la plataforma de levitación	27
4.2 Estructura de la plataforma	27
4.3 Actuador	28
5. CAPÍTULO 5. Desarrollo del sistema de control con arduino y un sensor infrarrojo para controlar la posición de una masa.	29
5.1 Sistema de control en lazo abierto	30
5.2 Sistema de control en lazo cerrado.....	31
5.3 Sensado	32
5.3.1 Sensor infrarrojo:.....	32
5.3.2 Sensor transmisor ir333a.....	33
5.3.3 Sensor receptor SFH2030	34
5.3.4 Adecuación de los sensores.....	36
5.3.5 Funcionamiento.....	36
5.4 Controlador.....	40
5.4.1 Arduino uno.....	40
5.4.2 Especificaciones del arduino uno [37]	41
5.4.3 PWM (Modulación por ancho de pulso).....	42
5.5 Interfaz de potencia.....	44
5.5.1 Transistor	44
5.6 Algoritmo realizado en arduino.....	47

6.	<i>CAPÍTULO 6. Pruebas y resultados</i>	50
6.1	Parámetros medidos de la bobina	50
6.2	Datos obtenidos del sensado y la adecuación de los sensores	51
7.	<i>CONCLUSIONES</i>	55
8.	<i>TRABAJOS FUTUROS</i>	56
9.	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Las líneas de campo magnético salen del polo norte y entran en el sur	14
Figura 2. Las líneas de campo magnético cerradas por los polos de un imán	15
Figura 3. El polo norte geográfico de la Tierra está cerca del polo sur magnético.....	15
Figura 4. Las líneas de campo producido por una corriente rectilínea son circunferencias cuyo centro está en el conductor	15
Figura 5. Campo magnético creado por una corriente	16
Figura 6. Campo creado por una espira circular	17
Figura 7. Campo magnético producido por un solenoide.....	18
Figura 8. Condición inicial de equilibrio	19
Figura 9. Esquema de semejanza al sistema para análisis de circuito magnético	21
Figura 10. Sistema de suspensión magnética.....	26
Figura 11. Prototipo final del soporte principal del levitador	28
Figura 12. Diseño del actuador implementado.....	29
Figura 13. Esquema general de un sistema.....	30
Figura 14. Sistema de control en lazo abierto.....	30
Figura 15. Sistema de control en lazo cerrado.....	31
Figura 16. Diodos infrarrojos.....	32
Figura 17. Ángulo de visión	33
Figura 18. Rangos máximos de operación a una temperatura de 25 °C [35]	33
Figura 19. Ángulo de dispersión sensor infrarrojo ir333a [35]	34
Figura 20. Ángulo de recepción del sensor SFH2030 [36].....	34
Figura 21. Rangos máximos de operación a una temperatura de 25 °C [36]	35
Figura 22. Funcionamiento diodos infrarrojos.....	37
Figura 23. Conexión diodo infrarrojos.....	37
Figura 24. Detección de un objeto	37
Figura 25. Intensidad de luz transmitida y recibida de los sensores infrarrojos.....	38
Figura 26. Conexión diseñada e implementada para sensores infrarrojos.....	38
Figura 27. Diseño del sensado por medio de la cantidad de luz percibida	38
Figura 28. Funcionamiento de los sensores afectados por una señal indeseada	39

Figura 29. Funcionamiento de los sensores para eliminar la señal indeseada	39
Figura 30. Placa arduino	40
Figura 31. Alimentación del arduino con una fuente externa	41
Figura 32. Conexión de los sensores con el arduino	41
Figura 33. Ciclo útil del PWM	42
Figura 34. Tensión promedio del PWM.....	43
Figura 35. Salida PWM arduino	43
Figura 36. Transistor	44
Figura 37. Diagrama interno transistor NPN y PNP.....	45
Figura 38. Configuración interna TIP122	45
Figura 39. Rangos de operación del TIP122 a 25°C [40].....	45
Figura 40. Interfaz de potencia.....	46
Figura 41. FLUKE PM6303A	50
Figura 42. Resistencia medida de la bobina a 1 kHz con el FLUKE PM6303A	51
Figura 43. Inductancia medida a 1 kHz con el FLUKE PM6303A	51
Figura 44. Posición Vs Resolución	52
Figura 45. Adecuación del sensado	52
Figura 46. Señal de salida PWM	53
Figura 47. Sistema de levitación implementado	53
Figura 48. Plataforma de levitación en funcionamiento.....	54
Figura 49. Distancia entre el objeto levitando y la bobina.....	54

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones del material utilizado	27
Tabla 2. Medidas para la elaboración de la plataforma de acrílico	28

1. CAPÍTULO 1. Introducción.

Hace años se trataba el magnetismo y la electricidad como fenómenos distintos y fueron estudiados por ciencias diferentes, sin embargo, esto cambió con el descubrimiento que realizó Christian Oersted, cuando observó que la orientación de la aguja de una brújula fue afectada al hacer circular corriente por un conductor cercano a ella. Desde entonces los estudios realizados por Oersted fueron en torno a demostrar que había una relación entre la electricidad y el magnetismo; él manifestó que las fuerzas magnéticas procedían de las fuerzas originadas entre las cargas eléctricas en movimiento.

El electromagnetismo es la rama de la física que estudia los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría, la cual demuestra que al circular una corriente eléctrica por un conductor, esta produce un campo magnético a su alrededor. Basados en la teoría electromagnética se realizó una plataforma de levitación, la cual consiste en generar un campo magnético producido por la circulación de corriente en una bobina e interactuar con el campo magnético producido por un imán de neodimio hasta dejar el imán suspendido en el aire sin soporte mecánico alguno. En el estudio de la levitación se pueden encontrar dos principios básicos: el principio de levitación por atracción y el principio de levitación por repulsión.

En este proyecto se desarrolló un sistema de levitación por atracción donde un cuerpo es atraído por un campo magnético en contra de la gravedad; para lograr el equilibrio se debe producir un campo electromagnético que produzca la misma fuerza de gravedad ejercida por el imán. Debido a que este fenómeno es muy inestable se hace necesario desarrollar un sistema de control. Por esta razón se presenta el diseño y construcción de un sistema de levitación, en el cual se implementa un controlador que será el encargado del funcionamiento del mismo. En la construcción del prototipo se destaca el sensado de la posición del objeto, el cual se lleva a cabo con sensores infrarrojos, los cuales nos permitirán detectar la presencia del imán, y así poder mantenerlo en esta posición.

1.1 Justificación.

Mantener la suspensión de un imán de neodimio en el aire sin la ayuda de un soporte mecánico, por medio de un campo magnético generado por un solenoide, resulta bastante atractivo. Por esto se desarrolló un sistema de levitación, el cual consta de un electroimán y un sistema electrónico. En este proyecto se ponen en práctica los conceptos vistos en las asignaturas de Electromagnetismo, Circuitos, Electrónica y Control.

Se implementó un sistema de desarrollo electrónico Arduino uno, el cual permitirá controlar y mantener la posición del imán, de acuerdo con los conceptos vistos en electrónica e instrumentación sobre los diversos sensores y sus aplicaciones, utilizaremos un sensor infrarrojo, el cual será el encargado de detectar una masa en su campo de visión. La energización o desenergización de la bobina se controlará por medio de un PWM (Modulación por ancho de pulso), ya que esta es la que proporciona la fuerza magnética necesaria para mantener la masa a una altura deseada.

1.2 Estado del arte.

En este capítulo se hará una revisión de la trascendencia y presencia que ha tenido la levitación magnética en varios ámbitos de la ingeniería.

A nivel de ingeniería, la levitación magnética se ha consolidado como una manera de reducir el consumo energético a varios niveles, debido a su particularidad de permitir el desplazamiento relativo entre dos superficies con ausencia de fricción, la cual se considera la principal responsable de las pérdidas de energía en sistemas electromecánicos tales como trenes, rodamientos, entre otros [1]. Así mismo, la levitación magnética se ha empleado en el desarrollo de trampas magnéticas que hacen uso del efecto Meissner en materiales superconductores como el helio líquido para repeler las líneas de campo y literalmente, confinar el líquido en una región del espacio al ser restringido magnéticamente en todas las direcciones [2]. La levitación magnética ha sido usada con éxito en cañones electromagnéticos empleándose para mover el proyectil, evitando el contacto de este con la superficie de la guía, y por tanto anulando la fricción mecánica [3]. En la medicina, la aplicación de este fenómeno físico ha aportado en el desarrollo de corazones artificiales implementados mediante bombas centrífugas donde el impulsor es levitado magnéticamente, lo que aumenta el desempeño del sistema y minimiza el consumo de energía, nuevamente, debido a la ausencia de fricción [4]. En la industria manufacturera, se han desarrollado máquinas de control numérico computarizado (CNC) cuyo soporte vertical es levitado magnéticamente [5], lo que aumenta considerablemente la velocidad de desplazamiento de la pieza móvil y la precisión del maquinado. También en el campo de los ambientes virtuales y los sistemas de teleoperación aparece la levitación magnética en lo que se conoce como tecnologías del tacto. En particular se han diseñado sistemas de interacción con el tacto, los cuales permiten tocar, sentir, manipular y alterar objetos levitados magnéticamente cuya variación de posición y ángulos es monitoreada mediante sensores; la información sensada es enviada a interfaces virtuales donde se encuentra un entorno de realidad virtual el cual varía según la modificación del objeto que levita [6]. Esta aplicación tiene un enorme potencial en la industria del entretenimiento y la manipulación de artefactos.

En el ámbito académico, la levitación magnética representa uno de los sistemas dinámicos más inestables y altamente no lineales, debido a la naturaleza de los campos electromagnéticos y al objetivo de la levitación como tal (compensar la fuerza gravitacional). Por esta razón, durante décadas ha sido una plataforma ideal de trabajo para investigadores, en la cual el objetivo es implementar técnicas de control tanto clásicas como modernas, siempre haciendo uso de las tecnologías emergentes a nivel de instrumentos electrónicos y nuevos materiales. A nivel mundial se han dado desarrollos exitosos de plataformas de levitación magnética en países como China [7–8], USA [9, 10], Argentina [11, 12], Brasil [13], Chile [14], Ecuador [15], México [16–17] Japón [18–19], Irlanda [20, 21], India [22, 23], Polonia [24], Taiwan [25, 26], Rumania [27] y Turquía [28]. Para la obtención de la levitación de un objeto en estos trabajos se han empleado varios tipos de controladores. Estos cubren desde el controlador PID (control proporcional, integral, y

derivativo), pasando por controladores de lógica difusa, controladores basados en redes neuronales artificiales, control H_∞ , control predictivo, hasta la combinación de dos o más de estos controladores, haciendo el control mucho más preciso, eficiente y complejo. En Colombia han surgido diversos proyectos de este tipo, en los cuales se ha conseguido la levitación magnética con éxito, aplicando técnicas de control lineal. De estas se destaca la obtenida en la Universidad Distrital de Bogotá, la cual se enfoca en la creación de un sistema de propulsión magnética para el transporte de materiales [29].

Por otro lado, la industria del entretenimiento y la cultura, que abarca aquellos sectores que tienen como objetivo común brindar un ambiente de relajación y diversión al tiempo que imparten educación e incentivan la imaginación, no ha sido ajena al desarrollo de productos que hacen uso de la levitación magnética. A nivel comercial se ofrecen sistemas de levitación, tal es el caso de los vistos en museos interactivos y en puntos de venta especializados en tecnología. Al ser el sistema de levitación magnética un producto científico que evidencia un fenómeno físico, se hace adecuado para ilustrar una gran cantidad de conocimiento aplicado, y esto es lo que se requiere en organizaciones con fines educativos.

En el programa de ingeniería eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira se desarrolló un control algebraico para un sistema de levitación magnética, usando estimación de parámetros en tiempo real, implementado en un procesador digital de señales (DSP), proyecto desarrollado por los estudiantes Manuel Nieto y Víctor Ortiz. Este trabajo contiene el desarrollo de un proyecto de levitación magnética, el cual permitirá plasmar los conocimientos adquiridos no solo en las asignaturas de control sino también de las diferentes materias vistas a través de la carrera, en un dispositivo capaz de hacer levitar un objeto ferromagnético; para este propósito fue necesario la utilización de dos metodologías de control: la primera es reubicación de polos, la cual se usa mientras se logra estimar la planta a través de método de mínimos cuadrados recursivos con factor de olvido, y la segunda, después de tener el modelo bien definido, la conmutación a un control algebraico, el cual le dará una mejor estabilidad al sistema al hacerlo más robusto frente a las perturbaciones. Es un modelo de estimación en línea, lo cual permite un grado alto de robustez ante variaciones de la planta y reaccionar de la mejor manera ante cambios de las referencias e incluso el cambio del objeto de levitación [31].

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Construir un sistema de levitación magnética controlado mediante un sistema de desarrollo electrónico Arduino uno y un sensor infrarrojo.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Estudiar el fenómeno del campo magnético generado por un solenoide con corriente colocado sobre un núcleo ferromagnético.
- Construir un sistema mecánico de soporte para los sensores y la bobina.
- Desarrollar un sistema de control para obtener la levitación magnética utilizando un sistema de desarrollo Arduino uno y un sensor infrarrojo para controlar la posición de un imán.

El presente trabajo comprende el diseño y construcción de un sistema de levitación electromagnético por atracción de un grado de libertad, este sistema se compone de una serie de subsistemas, como la estructura mecánica, la electrónica de sensado, la electrónica de potencia y el programa del controlador.

El documento se divide en capítulos de manera que se presente gradualmente cada paso necesario para el diseño del sistema de levitación electromagnético.

- Capítulo 1 aborda los aspectos generales del proyecto como son la justificación y los objetivos, además se hace una revisión del estado del arte de los sistemas de levitación.
- Capítulo 2 estudia los conceptos teóricos fundamentales de cómo se genera un campo magnético.
- capítulo 3 describe las condiciones de equilibrio que se deben tener en cuenta para encontrar la fuerza necesaria que se debe generar para mantener un imán suspendido en el aire.
- Capítulo 4 aborda todos los pasos llevados a cabo en la construcción de la plataforma de levitación y el actuador.
- Capítulo 5 desarrolla el sistema de control que será el encargado del comportamiento del sistema de levitación, donde se destaca el sensado de la posición del objeto, el cual es implementado con sensores infrarrojos, los cuales nos permitirán detectar la presencia del imán y mantenerlo en esta posición.
- Capítulo 6 expone los resultados experimentales en la implementación del sistema de levitación.

Finalmente, se mencionan las conclusiones del trabajo y se dan algunas perspectivas sobre futuros proyectos e implementación con base en el sistema de levitación obtenido.

2. CAPITULO 2. Conceptos fundamentales del campo magnético

2.1 Imanes

El fenómeno del magnetismo es conocido desde la antigüedad. Se descubrió en Magnesia (Asia Menor). Algunos cuerpos naturales, la magnetita fundamentalmente, atraen pequeños trozos de hierro. A tales cuerpos se les da el nombre de imanes naturales y la propiedad que tienen recibe el nombre de magnetismo.

Además de los imanes naturales, existen otras sustancias, como hierro, cobalto y níquel que pueden adquirir el magnetismo de manera artificial, se les da el nombre de imanes artificiales.

Todo imán, natural o artificial, presenta la máxima atracción magnética en los extremos que reciben el nombre de polos magnéticos norte y sur, porque un imán se orienta según los polos geográficos de la Tierra, que es un imán natural. Esta orientación es debido a la siguiente propiedad fundamental del magnetismo: “Polos del mismo nombre se repelen y polos de distinto nombre se atraen”.

Un imán origina un campo magnético en el espacio que le rodea. Este campo se pone de manifiesto por la fuerza que ejerce sobre otro imán o sobre un trozo de hierro que se coloque en su proximidad.

“Se dice que en una región del espacio existe un campo magnético cuando en ella se ponen de manifiesto fuerzas magnéticas”.

La dirección en la que apunta la aguja de la brújula se toma como dirección del campo magnético. Esto permite determinar la dirección del campo magnético en un punto, observando la orientación de la brújula colocada en dicho punto.

“El campo magnético en un punto tiene la dirección y sentido del eje S – N de la brújula”.

El campo magnético se representa gráficamente mediante líneas de fuerza o líneas de campo que, en este caso, reciben el nombre de líneas de inducción magnética. La dirección del campo es tangente en cada punto a las líneas de inducción.

El campo magnético se representa algebraicamente por el vector \vec{B}

Figura 1. Las líneas de campo magnético salen del polo norte y entran en el sur [41].

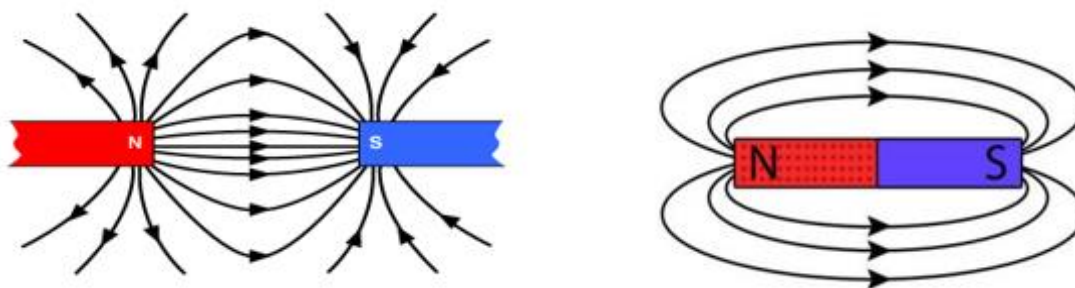


Figura 2. Las líneas de campo magnético cerradas por los polos de un imán [41].

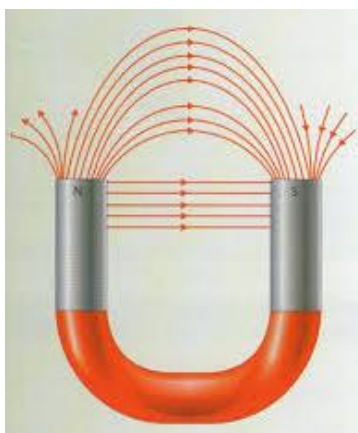


Figura 3. El polo norte geográfico de la Tierra está cerca del polo sur magnético [41].

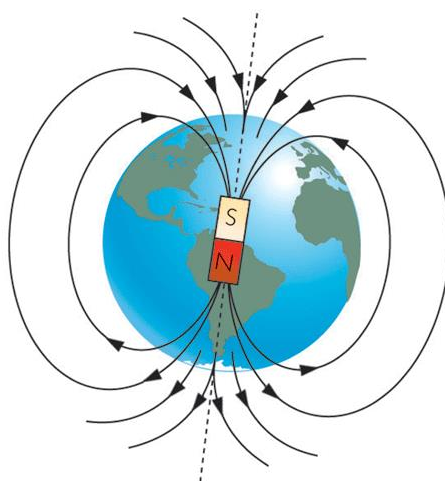
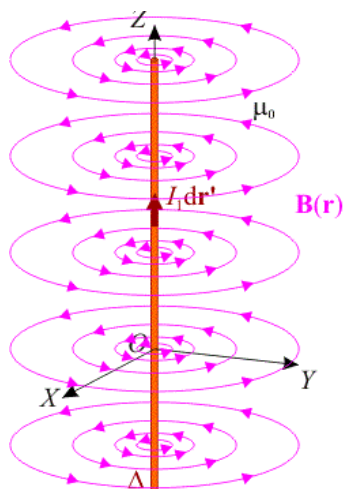


Figura 4. Las líneas de campo producido por una corriente rectilínea son circunferencias cuyo centro está en el conductor [41].



2.2 Fundamentos del electromagnetismo por André Marie Ampere:

- Cargas eléctricas en movimiento producen una interacción de tipo magnético, además de la interacción eléctrica dada por la ley de *Coulomb*. Producen una interacción electromagnética.
- Toda carga eléctrica en movimiento produce un campo magnético que actúa sobre otra carga, solamente si ésta se halla también en movimiento.
- Un campo magnético actúa sobre cargas que están en movimiento.
- Se dice que en un punto existe un campo magnético si una carga móvil colocada en él experimenta una fuerza.
- Las propiedades magnéticas de los imanes naturales son consecuencia también de las cargas móviles. Un imán natural tiene una gran cantidad de átomos, en los cuales existen electrones que giran alrededor del núcleo. Estos electrones producen minúsculos campos magnéticos cuya resultante puede producir un magnetismo exterior estable.
- Si un punto está sometido simultáneamente a dos campos magnéticos, el campo resultante es la suma vectorial de los campos. Se cumple el principio de superposición.

2.3 Campo magnético creado por una corriente.

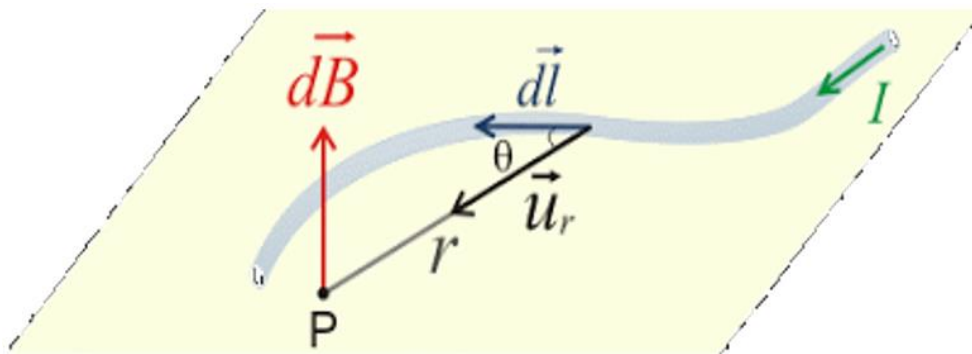
En la figura inferior se ha representado un hilo conductor de forma arbitraria por el que circula una intensidad de corriente I . Si por el hilo conductor circulan n cargas q por unidad de volumen, la corriente viene dada por:

$$I = qn v_d A$$

Siendo A la sección del hilo y v_d la velocidad de desplazamiento de las cargas.

Se puede representar un elemento de corriente mediante un vector de longitud dl y en el sentido de la corriente.

Figura 5. Campo magnético creado por una corriente [41].



El campo magnético $d\vec{B}$ que crea el elemento de corriente de longitud $d\vec{l}$ en un punto P del espacio es el campo magnético que crea en ese punto una carga puntual moviéndose a la velocidad de desplazamiento multiplicado por el número total de cargas que contiene el elemento de corriente:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

El campo total creado por el hilo en el punto P es la integral del campo creado por el elemento de corriente extendida a todo el hilo:

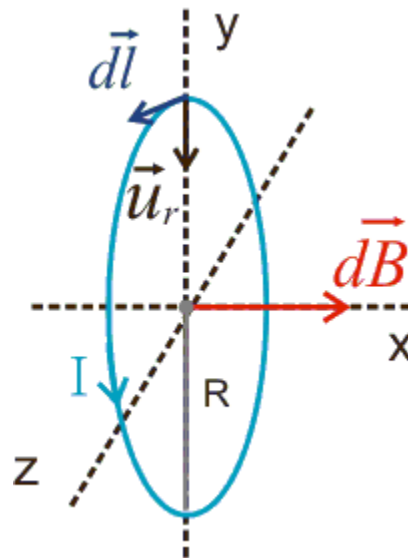
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

En general esta integral es complicada de calcular, salvo para situaciones sencillas en que la forma del hilo que transporta la corriente tiene cierto grado de simetría.

2.4 Campo creado por una espira circular.

Muchos de los dispositivos que se emplean para crear campos magnéticos cuentan entre sus componentes con bobinas. Cada vuelta de hilo de la bobina se denomina espira. El campo magnético producido por una espira circular en su centro es sencillo de calcular.

Figura 6. Campo creado por una espira circular



Para cualquier elemento de corriente $d\vec{l}$ que tomemos sobre la espira, el campo que produce en su centro es un vector en la dirección x y sentido positivo.

El módulo del campo $d\vec{B}$ creado por cualquier elemento de corriente viene dado por:

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{Idl}{R^2}$$

Donde R es el radio de la espira.

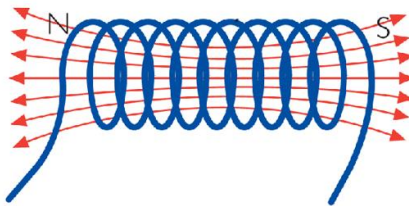
El campo total B está dado por:

$$B = \frac{\mu_o I}{2R}$$

2.5 Campo magnético producido por un solenoide.

Existe un conductor de numerosas aplicaciones, denominado solenoide. Se define como una bobina de forma cilíndrica que cuenta con un hilo de material conductor arrollado sobre sí, a fin de que, con el paso de la corriente eléctrica, se genere un intenso campo eléctrico. Cuando este campo magnético aparece, comienza a operar como un imán; el campo magnético es comparable al de un imán recto.

Figura 7. Campo magnético producido por un solenoide [41].



Si las espiras están muy cercanas en un solenoide las líneas de campo entran por un extremo, polo sur, y salen por el otro, polo norte. Si la longitud del solenoide es mucho mayor que su radio, las líneas que salen del extremo norte se extienden en una región amplia antes de regresar al polo sur; por esta razón, en el exterior del solenoide se presenta un campo magnético débil. Sin embargo, en el interior de éste, el campo magnético es más intenso y constante en todos los puntos.

La densidad de flujo magnético en un solenoide se calcula mediante:

$$B = \frac{\mu NI}{L}$$

Donde:

B : Densidad de flujo magnético en teslas (T)

μ : Permeabilidad del medio que rodea al conductor en $\frac{Tm}{A}$

I : Intensidad de la corriente que circula por el conductor en ampere (A)

N : Número de vueltas

L : Longitud de solenoide en metros (m)

Se llama electroimán a una barra de hierro rodeada de un solenoide que se transforma temporalmente en un imán al hacer circular una corriente eléctrica a través del solenoide.

Electroimán, dispositivo que consiste en un solenoide (una bobina cilíndrica de alambre recubierta de una capa aislante y arrollado en forma de espiral), en cuyo interior se coloca un núcleo de hierro. Si una corriente eléctrica recorre la bobina, se crea un fuerte campo magnético en su interior, paralelo a su eje. Al colocar el núcleo de hierro en este campo los dominios microscópicos que forman las partículas de hierro, que pueden considerarse pequeños imanes permanentes, se alinean en la dirección del campo, aumentando de forma notable la fuerza del campo magnético generado por el solenoide. La imantación del núcleo alcanza la saturación cuando todos los dominios están alineados, por lo que el aumento de la corriente tiene poco efecto sobre el campo magnético. Si se interrumpe la corriente, los dominios se redistribuyen y sólo se mantiene un débil magnetismo residual.

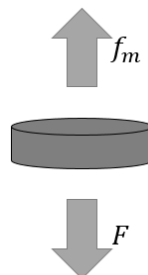
Los electroimanes se utilizan mucho en tecnología; son los componentes fundamentales de cortacircuitos y relés, se aplican a frenos y embragues electromagnéticos. En los ciclotrones se utilizan enormes electroimanes con núcleos de varios metros de diámetro; también se utilizan potentes electroimanes para levantar hierro y chatarra.

Si se enrolla un solenoide alrededor de una barra de hierro dulce (no de acero) se observará que esa barra adquiere las características de un imán mientras está pasando la corriente por el solenoide. Pero tan pronto como deja de pasar la corriente, pierde sus propiedades magnéticas.

3. CAPITULO 3. Condición de equilibrio.

El fenómeno de levitación electromagnética está basado en la interacción de campos magnéticos generados por medio de corrientes en un conductor (Henry Oersted), en el que se puede evidenciar los efectos de atracción sobre elementos de material ferromagnético, produciendo de esta manera un efecto de levitación al ubicar el electroimán enfrentado al cuerpo a una distancia determinada, en donde el campo magnético generado atraiga el cuerpo y se mantenga suspendido a una distancia controlada por sensores y sistemas de control, donde el propósito fundamental es generar la condición inicial de equilibrio sobre el cuerpo como se muestra en la siguiente figura.

Figura 8. Condición inicial de equilibrio.



F_{Tm} Fuerza resultante

F Fuerza mecánica de origen gravitacional

F_m Fuerza mecánica de origen magnética

$$F_{Tm} = |F_g - f_m| \quad (1)$$

Donde el resultado a esperar es $F_{Tm} = 0$ para cumplir con la condición inicial de equilibrio sobre el cuerpo, de allí que:

$$f_m = F \quad (2)$$

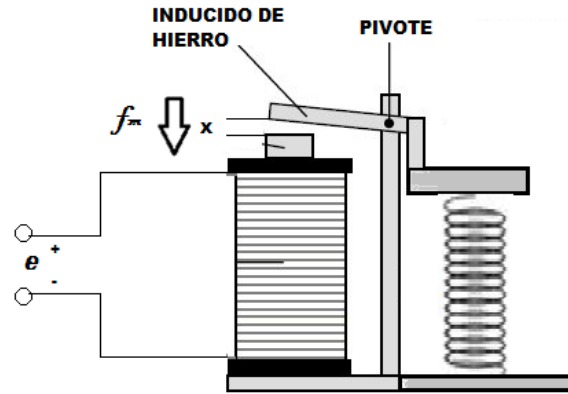
3.1 Análisis electromagnético del sistema.

Para comprender un poco lo que pasa en el sistema de levitación electromagnética, se hace el análisis del sistema por medio de circuitos magnéticos, el cual nos permite identificar la fuerza mecánica de origen magnética referida a un sistema y el comportamiento de sus componentes. Se habla de circuito magnético cuando se desea obtener en una región determinada por un material ferromagnético, un flujo magnético, para lo cual es preciso poder calcular la inducción magnética (H) y campo magnético (B) en todos los puntos de la estructura, donde ambas magnitudes son funciones del espacio y del tiempo, determinadas por la geometría de los conductores y de la estructura magnética. Teniendo en cuenta que es un problema que contiene materiales de características no lineales, una de las soluciones de este problema general, en una región determinada del espacio, exige que se satisfagan simultáneamente las tres condiciones siguientes:

- La inducción magnética (H) es igual en todos los puntos al campo magnético (B) dividido por la permeabilidad (μ), que es, en general, una variable dependiente de B .
- La integral de la componente normal de B extendida a una superficie cerrada de la región, debe ser nula.
- La integral de la componente tangencial de H a lo largo de un contorno cerrado cualquiera de la región, ha de ser igual a $4\pi i$, siendo i la intensidad de corriente circulante por el contorno.

Uno de los problemas que se presentan se puede resolver fácilmente al momento de conocer el campo magnético y el de obtener el flujo magnético total Φ que atraviesa la superficie, este flujo no es más que una componente de B normal a la superficie de la estructura, integrada en los límites establecidos de la misma[30].

Figura 9. Esquema de semejanza al sistema para análisis de circuito magnético



En la figura anterior se muestra un símil del sistema de levitación electromagnética, en donde la fuerza mecánica de origen gravitacional se ve representada por un resorte, de esta manera se puede dar un reflejo del análisis matemático para la formulación de la fuerza mecánica de origen magnética necesaria para la atracción del cuerpo enfrentado. El brazo soportado en el pivote se puede alejar y contraer en dirección a la cara del núcleo de la bobina que presenta una distancia inicial x .

Se puede calcular la fuerza requerida para desplazar el brazo, contra la fuerza de atracción magnética, aplicando el concepto del principio de la conservación de la energía al sistema, si en el sistema se produjeran cambios en la energía total se vería reflejada la ecuación de la conservación de la energía, que es:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{eléctrica} \\ \text{suministrada} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{mecánica} \\ \text{suministrada} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Aumento de la} \\ \text{energía} \\ \text{almacenada} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Energía convertida} \\ \text{irreversiblemente} \\ \text{en otras formas} \end{array} \right] \quad (3)$$

Considerando cada término de la ecuación anterior, cuando se aumenta el entrehierro en una razón de cambio (dx) durante un tiempo (dt) a causa de una fuerza f_m , la energía eléctrica suministrada (dW_e) es:

$$dW_e = e idt = N \frac{d\phi}{dt} * idt = N id\phi \quad (4)$$

e : Diferencia de potencial que aparece en los terminales de la bobina.

$\frac{d\phi}{dt}$: Variación del flujo debido al aumento de reluctancia.

$d\phi$: Variación total del flujo durante un tiempo.

La energía mecánica suministrada dW_m está definida por:

$$dW_m = f_m dx \quad (5)$$

dx : Variación de la distancia durante un tiempo.

Se tiene en cuenta que para la condición de equilibrio la fuerza mecánica de origen magnético ejercida f_m es igual a la fuerza mecánica ejercida F .

La energía almacenada en el sistema (W_s) es en forma de energía magnética, el incremento de esta energía (dW_s) contiene dos componentes, el incremento de la energía en el hierro (dW_{si}) y el incremento de energía en el aire del entrehierro (dW_{sa}). Teniendo en cuenta el volumen del núcleo, la energía entregada al campo magnético (dW) es:

$$dW = \frac{V}{4\pi} H dB \quad (6)$$

V : Volúmen

H : Inducción magnética

dB : Variación del campo

Lo que indica que la energía entregada al campo magnético no depende del tiempo que tarda en variar una cantidad, es decir, la cantidad de energía entregada al campo magnético depende únicamente de la variación de B y no de la velocidad con la que se produce dicha variación.

De lo anterior se dice que el incremento en el hierro está definido por:

$$dW_{si} = \frac{V_i}{4\pi} H_i dB_i \quad (7)$$

V_i : Volumen del hierro

H_i : Inducción magnética en el hierro

dB_i : Variación del campo en el hierro

El incremento en el aire del entrehierro se debe tanto a la variación de la inducción magnética en el entrehierro (B_a), como en la variación del volumen del entrehierro (V_a) la mejor manera de obtenerlo es derivando con respecto a x la expresión de la energía total almacenada (W).

$$W = \frac{B^2}{8\pi\mu} \quad (8)$$

μ : Permeabilidad del material

De la ecuación 8, se obtiene la expresión de la energía total almacenada en el entrehierro (dW_{sa}), después de multiplicar por el volumen del entrehierro y derivando con respecto a x la expresión.

Donde:

$$W_{sa} = \frac{V_a B_a^2}{8\pi\mu_0} \quad (9)$$

μ_0 : Permeabilidad del aire $\left(4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}\right)$

Derivando con respecto a x se obtiene que:

$$\frac{dW_{sa}}{dx} = \frac{B_a^2}{8\pi\mu_0} \cdot \frac{dV_a}{dx} + \frac{2V_a B_a}{8\pi\mu_0} \cdot \frac{dB_a}{dx} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que el volumen del entrehierro está definido por:

$$V_a = A_a x \quad (11)$$

A_a : Área de la sección recta del entrehierro

El diferencial de almacenamiento de energía en el entrehierro a lo largo de la variación de la distancia (dx) será igual a la expresión de la ecuación 10 multiplicada por dx , es decir:

$$\frac{dW_{sa}}{dx} dx = dW_{sa} \quad (12)$$

Por lo tanto se obtiene que:

$$dW_{sa} = \frac{B_a^2}{8\pi\mu_0} \cdot dV_a + \frac{V_a B_a}{4\pi\mu_0} \cdot dB_a \quad (13)$$

Como diferencial de volumen se tiene:

$$dV_a = A_a dx \quad (14)$$

Reemplazando en la ecuación 13

$$dW_{sa} = \frac{B_a^2}{8\pi\mu_0} \cdot A_a dx + \frac{V_a B_a}{4\pi\mu_0} \cdot dB_a \quad (15)$$

Como

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_0} \quad (16)$$

Despejando la permeabilidad y reemplazando en la ecuación 15

$$dW_{sa} = \frac{H_a B_a A_a}{8\pi} \cdot dx + \frac{V_a H_a}{4\pi} \cdot dB_a \quad (17)$$

La energía convertida irreversiblemente en otras formas presentes en la ecuación de la conservación de la energía, contiene la conversión de calor por la energía eléctrica o magnética, a causa de la histéresis y corrientes de Foucault, lo que hace que este término se considere nulo.

De lo anteriormente dicho se reemplaza, utilizando las ecuaciones 4, 5, 7, 17, en la ecuación de la conservación de la energía y se obtiene que:

$$dW_e + dW_m = dW_{si} + dW_{sa} + 0 \quad (18)$$

De lo que se obtiene que:

$$Nid\phi + f_m dx = \frac{V_i}{4\pi} H_i dB_i + \frac{H_a B_a A_a}{8\pi} \cdot dx + \frac{V_a H_a}{4\pi} \cdot dB_a \quad (19)$$

Para una visualización más clara y conservando la terminología se expresa $Nid\phi$ en términos de campo magnético, inducción magnética, en el hierro y el entrehierro de la siguiente manera:

$$4\pi Ni = H_a x + H_i L_i \quad (20)$$

L_i : Longitud total de recorrido del flujo en el hierro

Teniendo en cuenta que:

$$d\phi = A_i dB_i = A_a dB_a \quad (21)$$

De la ecuación 20 se despeja la expresión Ni , se multiplica por $d\phi$ y se reemplaza dicho término por el equivalente respectivo mostrado en la ecuación 22, obteniéndose la expresión (22)

$$Nid\phi = \frac{A_i L_i H_i dB_i + A_a x H_a dB_a}{4\pi} \quad (22)$$

Sustituyendo la ecuación 22 en la ecuación 19, se obtiene reduciendo términos semejantes y dividiendo entre x la expresión de la fuerza mecánica de origen magnético.

$$f_m = \frac{H_a B_a A_a}{8\pi} \quad (23)$$

Cambiando el valor de la inducción magnética por su equivalente se tiene que la fuerza mecánica de origen magnética es:

$$f_m = \frac{B_a^2 A_a}{8\pi\mu_0} \quad (24)$$

Como resultado se obtiene la ecuación característica de la fuerza mecánica de origen magnético en función del campo y del área del entrehierro, lo que permite relacionar que al aumento de campo se observaría que el área del entrehierro disminuye y viceversa. Para una comprensión más detallada de lo que pasa ante la variación de la distancia del entrehierro con respecto al campo magnético se tiene en cuenta que la magnitud del campo magnético es inversamente proporcional a la distancia del entrehierro $(B \propto \frac{1}{x})$.

Teniendo en cuenta que el campo magnético es proporcional a la corriente inyectada, se puede decir que:

$$B = Ki \quad (25)$$

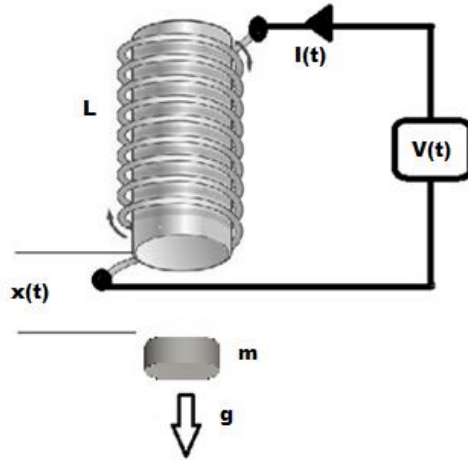
Donde K es una constante de magnetización referida a los términos constantes de la ecuación 24.

3.2 Análisis de la dinámica del sistema.

Para efectos del análisis de la dinámica del sistema, se plantea un nuevo modelo de análisis, teniendo presente que un modelo matemático no es único para un sistema determinado, motivo por el cual se pueden tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva.

Para describir la dinámica de muchos sistemas físicos en términos de ecuaciones diferenciales se obtienen a partir de las leyes físicas que gobiernan un determinado sistema, algunos ejemplos de leyes físicas aplicables serían las leyes de Newton para sistemas mecánicos y las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos.

Figura 10. Sistema de suspensión magnética



Dónde:

$x(t)$: Distancia entre el electroimán y el imán

$v(t)$: Tensión de alimentación del electroimán

$i(t)$: Corriente circulante por el electroimán

R_L : Resistencia del electroimán

L : Inductancia del electroimán

m : Masa del cuerpo

g : Aceleración gravitacional

Se tiene en cuenta la segunda ley de Newton (Ley de Fuerza) para la parte mecánica del sistema, en la que se evidencia la interacción de una masa y de su aceleración en la fuerza ejercida sobre un cuerpo, de donde se tiene que:

$$F = ma \quad (26)$$

Se sabe que la aceleración sobre el cuerpo está dada por la gravedad presente en el medio, obteniendo que:

$$F = mg \quad (27)$$

Donde la aceleración está definida como la segunda derivada de la distancia con respecto al tiempo.

$$F = m \frac{d^2 x(t)}{d^2 t} \quad (28)$$

De las ecuaciones 16

, 24 y 25 la fuerza mecánica de origen magnético generada por una corriente circulante en la bobina está dada por:

$$f_m = \frac{K_m i(t)^2}{x(t)^2} \quad (29)$$

F_m : Fuerza mecánica de origen magnético

$y(t)$: Distancia entre el electroimán y el imán

$i(t)$: Corriente circulante por el electroimán

K_m : Constante magnética del imán

4. CAPITULO 4. Construcción de la plataforma de levitación y el actuador.

4.1 Construcción de la plataforma de levitación.

En este capítulo se describen cada uno de los pasos necesarios para el desarrollo de una plataforma: soportes, actuador y sensores; se detallan cada una de las partes y las dimensiones que componen la plataforma, así como los tipos de materiales utilizados y el motivo de su elección.

4.2 Estructura de la plataforma.

En la construcción del soporte para el levitador electromagnético se deben considerar los siguientes factores: dimensiones, rigidez mecánica y la no magnetización del material para evitar el desvío de las líneas del campo magnético. Haciendo consideración de los factores mencionados anteriormente, se ha seleccionado un acrílico, ya que cumple con la rigidez necesaria para nuestra aplicación y no es magnetizable.

Tabla 1. Especificaciones del material utilizado

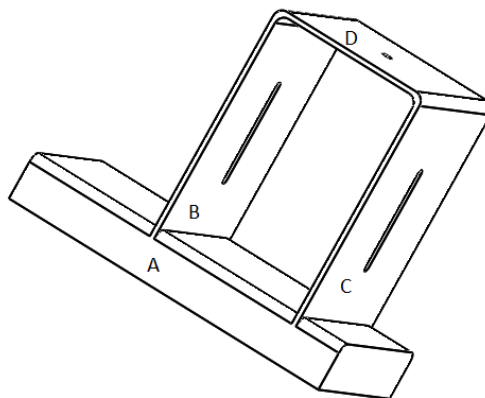
Descripción	Dimensiones
Largo	36 cm
Ancho	20 cm
Espesor	1 cm

La estructura de la plataforma de levitación se muestra en la figura 11, esta plataforma está conformada por una base superior la cual es utilizada como soporte del actuador, dos paredes laterales donde son colocadas las dos partes que constituyen el sensor de posición, una base inferior rectangular la cual da soporte al conjunto de piezas anteriormente mencionadas y a los circuitos electrónicos. Las dimensiones de cada una de las piezas que constituyen la estructura de la plataforma fueron elegidas considerando el área suficiente para cada una de las partes que forman el levitador electromagnético. En la tabla 2 se muestran las dimensiones de cada una de las piezas.

Tabla 2. Medidas para la elaboración de la plataforma de acrílico

Nombre de la pieza	Descripción	Medidas (cm)
A	Base inferior rectangular	36 x 17 x 5
B	Pared lateral derecha	24 x 17
C	Pared lateral izquierda	24 x 17
D	Base superior	20 x 17

Figura 11. Prototipo final del soporte principal del levitador



4.3 Actuador.

Para comprender porqué se escogió un material ferromagnético como núcleo del actuador, se presenta a continuación una breve descripción de las propiedades y características de este material.

Propiedades de los materiales ferromagnéticos

- Aparece una gran inducción magnética al aplicarle un campo magnético.
- Permiten concentrar con facilidad líneas de campo magnético, acumulando densidad de flujo magnético elevado.
- Se utilizan estos materiales para delimitar y dirigir a los campos magnéticos en trayectorias bien definidas.

Características de los materiales ferromagnéticos

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por uno o varios de los siguientes atributos:

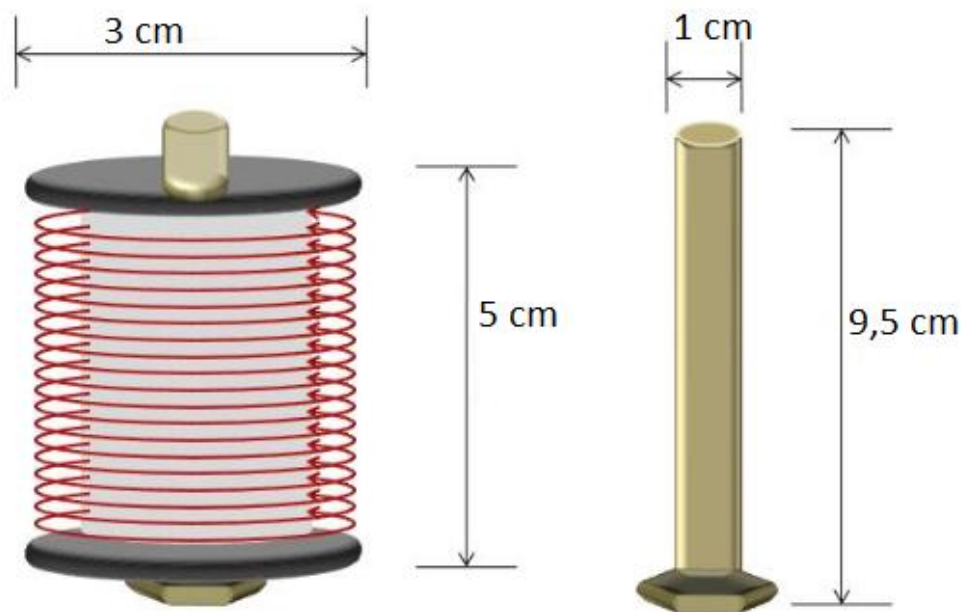
- Pueden imantarse más fácilmente que los demás materiales. Esta característica viene indicada por una gran permeabilidad relativa.
- Tienen una inducción magnética intrínseca máxima muy elevada.

- Se imanar con una facilidad muy diferente según sea el valor del campo magnético. Este atributo lleva una relación no lineal entre los módulos de inducción magnética (B) y campo magnético.
- Un aumento del campo magnético les origina una variación de flujo diferente de la variación que originaría una disminución igual de campo magnético. Este atributo indica que las relaciones que expresan la inducción magnética y la permeabilidad (μ) como funciones del campo magnético, no son lineales ni uniformes.
- Conservan la imanación cuando se suprime el campo.
- Tienden a oponerse a la inversión del sentido de la imanación una vez imantados.

Con estas propiedades de los materiales nos dispusimos a utilizar un tornillo como nuestro núcleo ya que están compuestos por hierro generalmente.

El dispositivo actuador es un electroimán del tipo solenoide de 5 cm de altura por 3 cm de diámetro, el cual está constituido aproximadamente por 1.200 vueltas de cable de cobre del N° 22, arrollado alrededor de un tornillo de hierro de 9,5 cm de largo y 1 cm de diámetro. La resistencia promedio de la bobina es de aproximadamente 32Ω , en la figura 12 se muestra el actuador y el núcleo de hierro, así como las dimensiones de cada uno de ellos.

Figura 12. Diseño del actuador implementado [42].

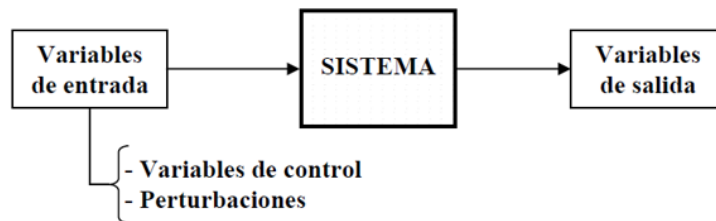


5. CAPÍTULO 5. Desarrollo del sistema de control con arduino y un sensor infrarrojo para controlar la posición de una masa.

Un sistema dinámico puede definirse conceptualmente como un ente que recibe unas acciones externas o variables de entrada, y cuya respuesta a estas acciones externas son las denominadas variables de salida.

Las acciones externas al sistema se dividen en dos grupos: variables de control, que se pueden manipular, y perturbaciones, sobre las que no es posible ningún tipo de control. La Figura 14 ilustra de un modo conceptual el funcionamiento de un sistema.

Figura 13. Esquema general de un sistema.

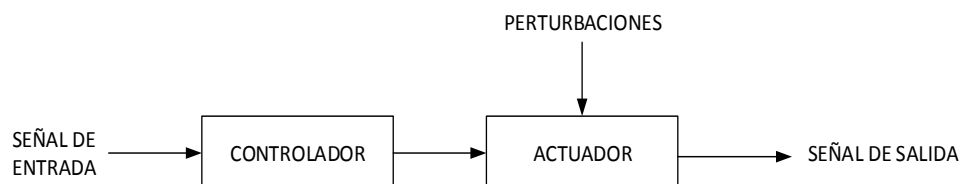


Dentro de los sistemas se encuentra el concepto de sistema de control. Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna).

5.1 Sistema de control en lazo abierto.

Aquellos en los que la variable de salida (variable controlada) no tiene efecto sobre la acción de control (variable de control).

Figura 14. Sistema de control en lazo abierto.



Características:

- No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia).

- A cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada.
- La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.
- En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente.
- El control en lazo abierto suele aparecer en dispositivos con control secuencial, en el que no hay una regulación de variables sino que se realizan una serie de operaciones de una manera determinada. Esa secuencia de operaciones puede venir impuesta por eventos (event-driven) o por tiempo (timed-driven). Se programa utilizando PLCs (controladores de lógica programable).

5.2 Sistema de control en lazo cerrado.

El control retroalimentado o lazo cerrado tiene la característica de que mide cierta cantidad de la salida y luego la comparamos con un valor deseado, y el error resultante lo utiliza para corregir la salida del sistema.

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

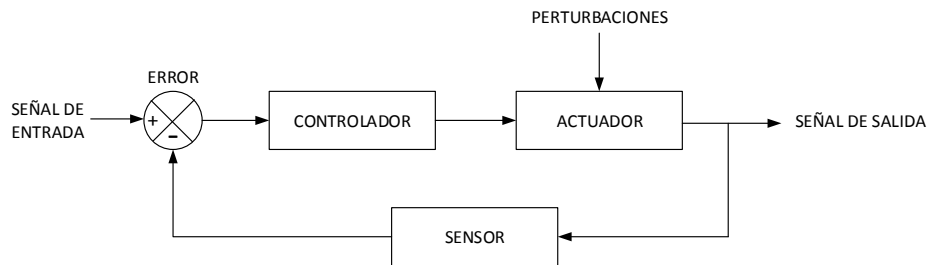
- Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
- Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.
- Ser de fácil implementación y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- Sensores: Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
- Controlador: Es el encargado de calcular la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia.
- Actuador: Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

La figura 15 ilustra el esquema de funcionamiento de un sistema de control en lazo cerrado [32, 33].

Figura 15. Sistema de control en lazo cerrado.



5.3 Sensado.

El sensado es fundamental a la hora de controlar un proceso, ya que este nos informará el estado en el que se encuentra el proceso. En los sistemas de control en lazo cerrado este nos permitirá mantener una posición o un rango en el cual se mantendrá en funcionamiento el proceso, esta posición es fijada por el usuario.

5.3.1 Sensor infrarrojo:

Figura 16. Diodos infrarrojos.



La parte del sensado se realiza con sensores infrarrojos uno como transmisor y otro como receptor; estos sensores se caracterizan por su bajo costo. Es una tecnología que inició en los años 90s, y detectan la radiación emitida por los materiales calientes y la transforman en una señal eléctrica.

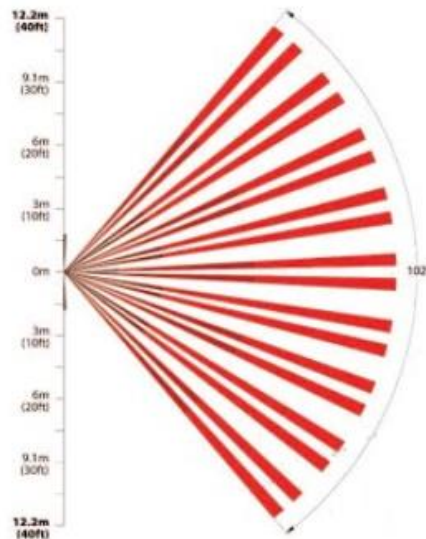
El sensor infrarrojo requiere de una comunicación lineal entre transmisor y receptor, lo que hace impredecible la línea de vista para su efectiva transmisión, por lo tanto, siempre será uno a uno, dejando de lado las configuraciones multipunto.

Los sensores infrarrojos están diseñados especialmente para la detección, clasificación y posicionado de objetos; la detección de formas, colores y diferencias de superficie, incluso bajo condiciones ambientales extremas. Este componente puede tener la apariencia de un LED normal; la diferencia radica en que la luz emitida por él no es visible para el ojo humano, únicamente puede ser percibida por otros dispositivos electrónicos.

El uso de infrarrojo está siendo ampliado al usarse en aparatos tales como: Aire acondicionado, para la apertura de puertas, control de reproductores portátiles, etc.

Los sensores infrarrojos, a pesar de tener una comunicación lineal, emiten un haz de luz el cual tiene una abertura angular; se utiliza este principio de funcionamiento para mantener la posición del objeto de acuerdo a la intensidad de luz que reciba [34].

Figura 17. Ángulo de visión.



Las características de los sensores utilizados se muestran a continuación:

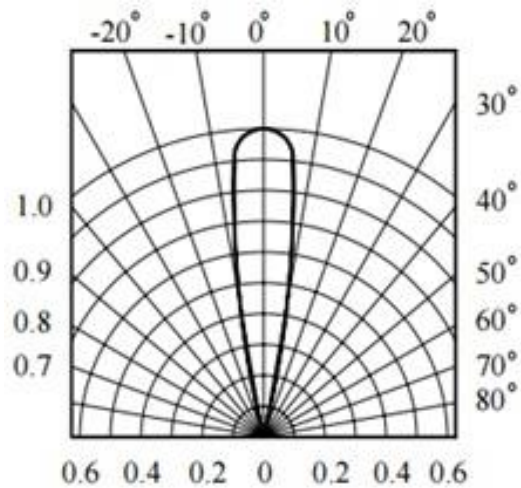
5.3.2 Sensor transmisor ir333a

- Alta fiabilidad
- Alta intensidad radiante
- Longitud de onda de 940nm
- Baja tensión directa [35]

Figura 18. Rangos máximos de operación a una temperatura de 25 °C [35].

Parameter	Symbol	Rating	Units
Continuous Forward Current	I_F	100	mA
Peak Forward Current	I_{FP}	1.0	A
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{opr}	-40 ~ +85	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +85	°C
Soldering Temperature	T_{sol}	260	°C
Power Dissipation at(or below) 25°C Free Air Temperature	P_d	150	mW

Figura 19. Angulo de dispersión sensor infrarrojo ir333a [35].



5.3.3 Sensor receptor SFH2030.

- Adecuado para aplicaciones en Intervalo de 400 nm a 1100 nm.
- El tiempo de conmutación Corto (típ. 5 ns).
- Barreras de luz directa y rápida para la variación de la intensidad.

Figura 20. Ángulo de recepción del sensor SFH2030 [36].

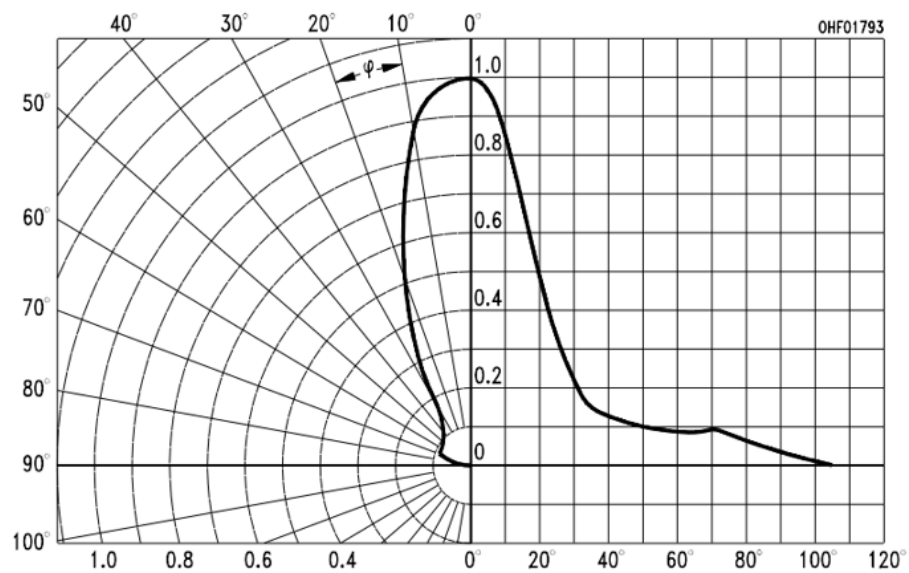


Figura 21. Rangos máximos de operación a una temperatura de 25 °C [36]

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value		Einheit Unit
		SFH 2030	SFH 2030 F	
Fotoempfindlichkeit Spectral sensitivity $V_R = 5 \text{ V}$, Normlicht/standard light A, $T = 2856 \text{ K}$, $V_R = 5 \text{ V}$, $\lambda = 950 \text{ nm}$, $E_e = 0.5 \text{ mW/cm}^2$	S S	80 (≥ 50) –	– 25 (≥ 15)	nA/lx μA
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S \text{ max}}$	850	900	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von S_{max} Spectral range of sensitivity $S = 10\%$ of S_{max}	λ	400 ... 1100	800 ... 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	1	1	mm^2
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	1 x 1	1 x 1	mm
Abstand Chipoberfläche zu Gehäuseoberfläche Distance chip front to case surface	H	4.0 ... 4.6	4.0 ... 4.6	mm
Halbwinkel Half angle	ϕ	± 20	± 20	Grad deg.
Dunkelstrom, $V_R = 20 \text{ V}$ Dark current	I_R	1 (≤ 5)	1 (≤ 5)	nA
Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 850 \text{ nm}$ Spectral sensitivity	S_λ	0.62	0.59	A/W
Quantenausbeute, $\lambda = 850 \text{ nm}$ Quantum yield	η	0.89	0.86	Electrons Photon
Leerlaufspannung Open-circuit voltage $E_v = 1000 \text{ lx}$, Normlicht/standard light A, $T = 2856 \text{ K}$ $E_e = 0.5 \text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950 \text{ nm}$	V_L V_L	420 (≥ 350) –	– 370 (≥ 300)	mV mV
Kurzschlußstrom Short-circuit current $E_v = 1000 \text{ lx}$, Normlicht/standard light A, $T = 2856 \text{ K}$ $E_e = 0.5 \text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950 \text{ nm}$	I_K I_K	80 –	– 25	μA μA
Anstiegs und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent $R_L = 50 \text{ k}\Omega$; $V_R = 20 \text{ V}$; $\lambda = 850 \text{ nm}$; $I_P = 800 \mu\text{A}$	t_r, t_f	5	5	ns
Durchlaßspannung, $I_F = 80 \text{ mA}$, $E = 0$ Forward voltage	V_F	1.3	1.3	V
Kapazität, $V_R = 0 \text{ V}$, $f = 1 \text{ MHz}$, $E = 0$ Capacitance	C_0	11	11	pF
Temperaturkoeffizient von V_L Temperature coefficient of V_L	TC_V	–2.6	–2.6	mV/K
Temperaturkoeffizient von I_K Temperature coefficient of I_K Normlicht/standard light A $\lambda = 950 \text{ nm}$	TC_I	0.18 –	– 0.2	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung Noise equivalent power $V_R = 10 \text{ V}$, $\lambda = 850 \text{ nm}$	NEP	2.9×10^{-14}	2.9×10^{-14}	$\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Nachweisgrenze, $V_R = 20 \text{ V}$, $\lambda = 850 \text{ nm}$ Detection limit	D^*	3.5×10^{12}	3.5×10^{12}	$\frac{\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$

Las principales ventajas del sensor infrarrojo son:

- Tensión de alimentación baja.
- Bajo costo.
- Circuitería simple: no requiere hardware especial, puede ser incorporado en el circuito integrado de un producto.

Las principales desventajas son:

- Se bloquea la transmisión con materiales comunes: personas, paredes, plantas, etc.
- Corto alcance: el desempeño cae con distancias más largas.
- Sensible a la luz y el clima. Luz directa del sol, lluvia, niebla, polvo, polución pueden afectar la transmisión.
- Velocidad: la transmisión de datos es más baja que la típica transmisión cableada. [34].

5.3.4 Adecuación de los sensores.

De acuerdo con el funcionamiento lineal de los sensores y con su abertura angular, se detectara si hay un objeto y se mantiene en la posición establecida; para mantener la posición se utiliza un arduino, el cual es el encargado de adquirir la señal sensada y controlar el objeto.

El sensado se realiza por medio del sensor infrarrojo trasmisor el cual emite un haz de luz constantemente y luego captara la señal por medio del puerto analógico del arduino. La intensidad de luz recibida permite observar el comportamiento de la masa.

5.3.5 Funcionamiento.

Si la intensidad de luz disminuye es porque el objeto se está subiendo y acercándose al solenoide, entonces se deberá reducir la potencia de la bobina.

Si la intensidad de luz aumenta es porque el objeto está bajando y alejándose del solenoide, entonces deberá aumentarse la potencia de la bobina.

En las siguientes figuras se puede observar el modo de conexión más común de los diodos infrarrojos y su funcionamiento.

Figura 22. Funcionamiento diodos infrarrojos.



Figura 23. Conexión diodo infrarrojos.

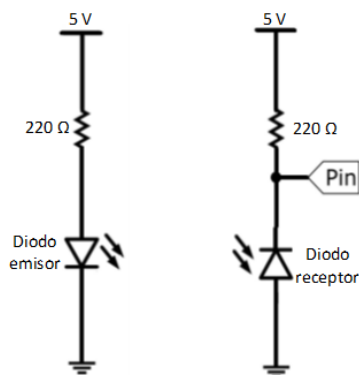
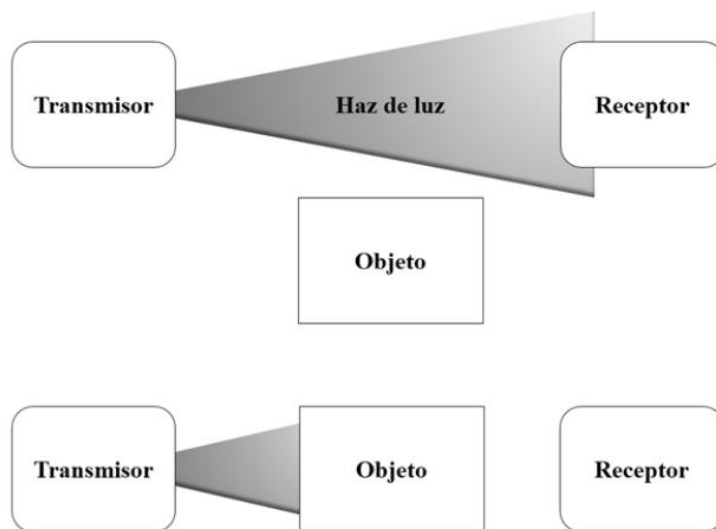


Figura 24. Detección de un objeto.



Para la plataforma de levitación se ha empleado la misma conexión, el único cambio es que la detección se realiza por medio de la intensidad de luz recibida. Modelo diseñado para el sistema de levitación:

Figura 25. Intensidad de luz transmitida y recibida de los sensores infrarrojos.

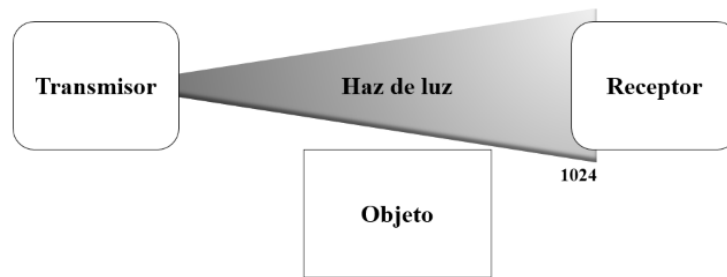


Figura 26. Conexión diseñada e implementada para sensores infrarrojos.

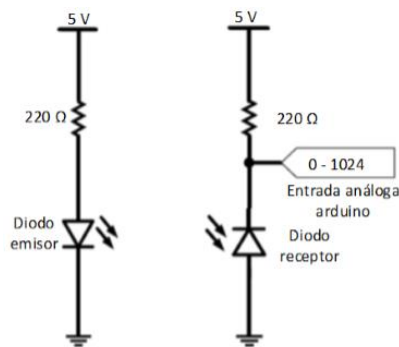


Figura 27. Diseño del sensado por medio de la cantidad de luz percibida.



Debido a que en el entorno existen perturbaciones, se debe realizar un filtrado o una corrección, para esto se utiliza una técnica que consiste en apagar cada segundo el sensor infrarrojo transmisor y se sensa la luz ambiente y las demás perturbaciones, para realizar esta corrección se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Sensado} = \text{sensado}(\text{sensor}) - \text{sensado}(\text{ambiente})$$

Con esto se logra darle estabilidad al sistema, eliminando las señales indeseadas y obtener una señal confiable.

Figura 28. Funcionamiento de los sensores afectado por una señal indeseada.

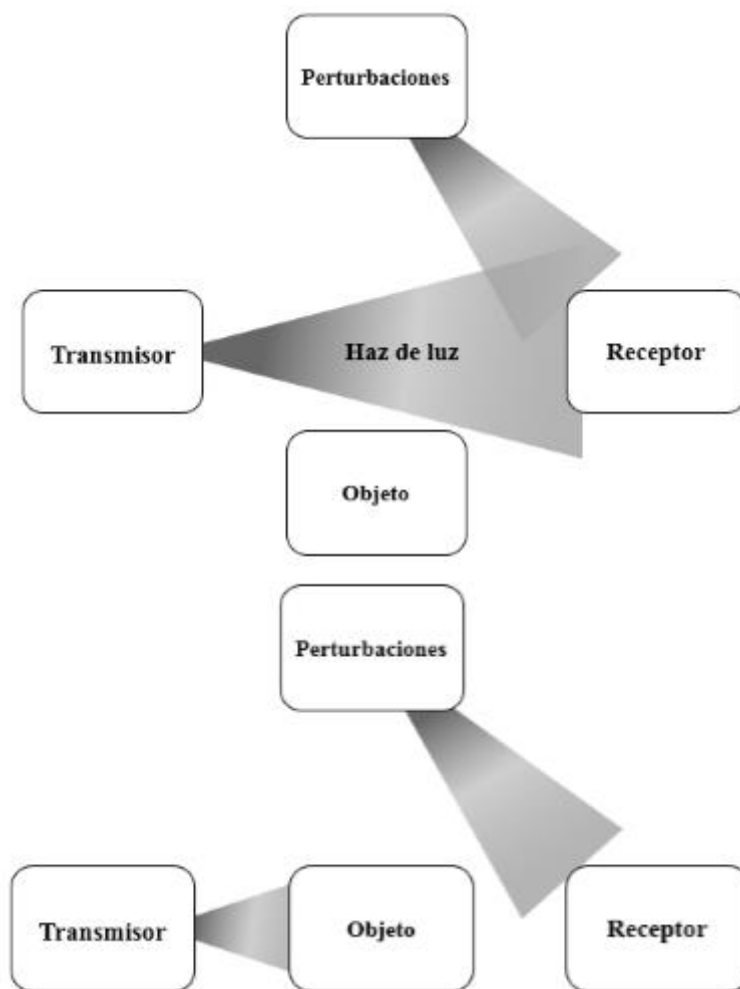
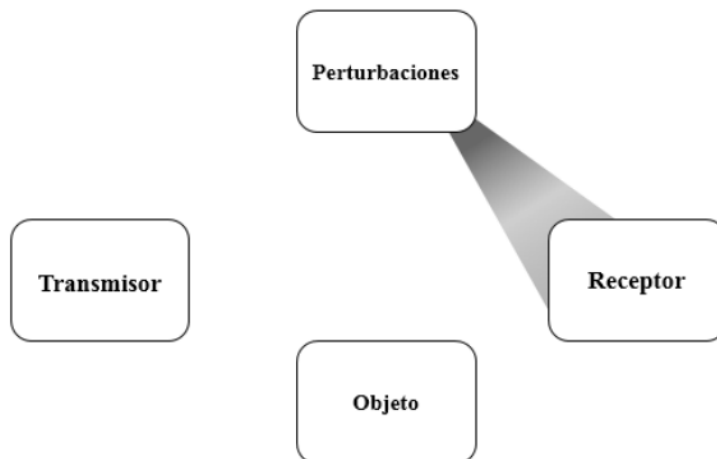


Figura 29. Funcionamiento de los sensores para eliminar la señal indeseada.



5.4 Controlador.

Para la etapa de control se emplea un microcontrolador con el cual podemos enviar, recibir y procesar los datos obtenidos por los sensores infrarrojos. En este caso, se eligió el arduino uno, con él podemos enviar y recibir señales analógicas o digitales.

5.4.1 Arduino uno.

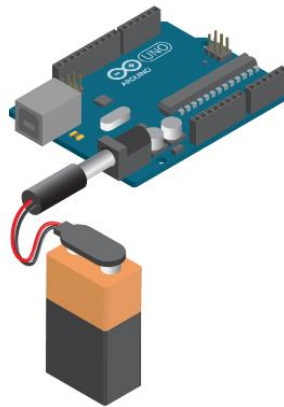
Figura 30. Placa arduino.



Arduino es una plataforma de hardware de código abierto, basada en una sencilla placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo que está basado en el lenguaje de programación Processing. Es un dispositivo que conecta el mundo físico con el mundo virtual, o el mundo analógico con el digital.

Las placas arduino se conectan al ordenador utilizando un cable USB, al igual que cualquier otro periférico, como la impresora, el teclado o incluso, un mando de videojuegos. Arduino necesita estar conectado al ordenador a través del cable USB para cargar un programa; el cable USB sirve también para suministrar energía a la placa, pero también puede alimentarse usando una fuente de energía externa, como una batería o un transformador apropiado [37].

Figura 31. Alimentación del arduino con una fuente externa.

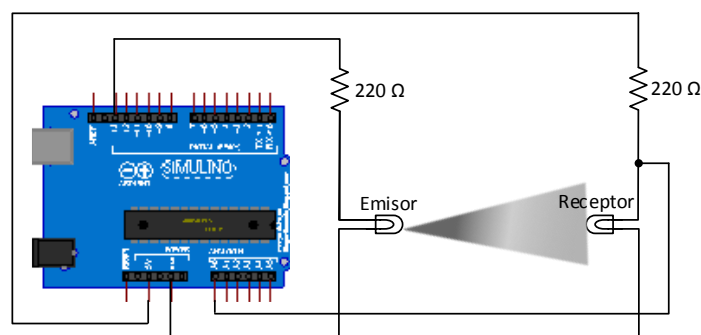


5.4.2 Especificaciones del arduino uno [37].

Microcontrolador	ATmega328
Tensión de operación	5V
Tensión de entrada (recomendado)	7-12V
Tensión de entrada (limites)	6-20V
Pines digitales I/O	14 (con 6 pines para PWM)
Pines analógicos de entrada	6
Corriente DC por pin I/O	40 mA
Corriente DC por pin para 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328)
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidad	16 MHz

El arduino es el encargado de enviar un dato por medio del transmisor y recibir una señal por el puerto análogo, de acuerdo a la señal recibida el programa debe hacer la corrección para mantener el objeto en su posición.

Figura 32. Conexión de los sensores con el arduino.

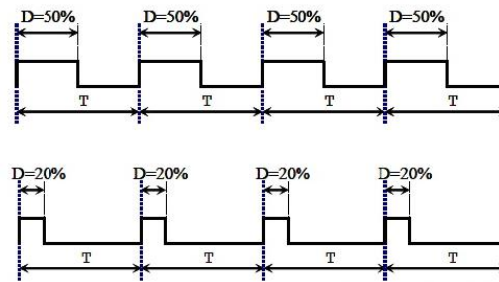


Después de tener el diseño de la conexión se deberá programar el arduino para que envíe y reciba los datos, de esta manera se podrá observar el comportamiento de la masa que se desea suspender. Lo primero que se debe realizar es enviar los pulsos.

5.4.3 PWM (Modulación por ancho de pulso).

Es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo (D) de una señal periódica (una sinusoidal o cuadrada), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga, es una técnica que entrega resultados análogos con medios digitales.

Figura 33. Ciclo útil del PWM.



El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente:

D: es el ciclo de trabajo.

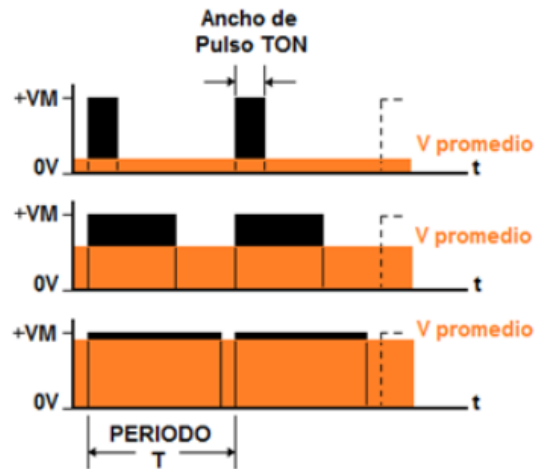
τ : es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso).

T: es el período de la función.

$$D = \frac{\tau}{T}$$

En la siguiente figura se observa de forma más detallada lo que sucede con la variación del ancho de pulso T_{ON} , ya que con este se logra la regulación de la tensión manteniendo el periodo constante [38].

Figura 34. Tensión promedio del PWM.

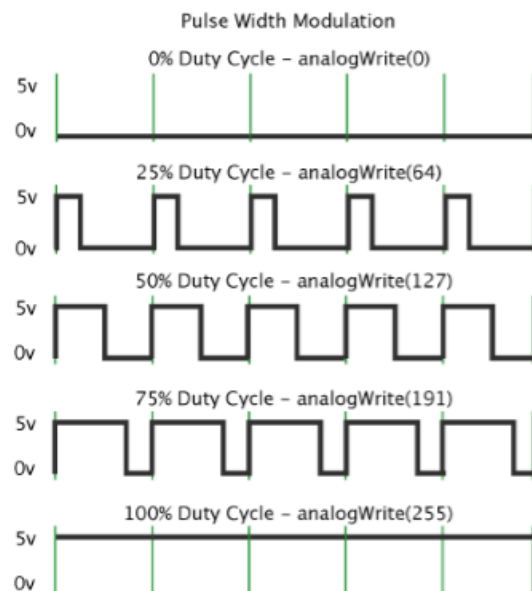


Donde $V_{promedio}$ se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V_{promedio} = V_M \left(\frac{T_{ON}}{T} \right)$$

El PWM es generado por el arduino ya que este cuenta con puertos especiales para realizar la modulación, el arduino maneja tensiones de 0 V a 5 V y para obtener un ciclo de trabajo se obtiene por la escala predefinida de 0 a 255, de tal manera que 255 será un ciclo de trabajo del 100 % [37].

Figura 35. Salida PWM arduino.



5.5 Interfaz de potencia.

En la mayoría de circuitos electrónicos se debe controlar una carga que tiene diferentes parámetros ya sea el nivel de tensión, corriente o potencia, para esto es necesario realizar un interfaz que nos permita controlar dicha carga y a la vez aislar los dos circuitos para evitar fallos eléctricos.

Los interfaces más comunes se realizan por medio de transistores y relés, aunque existen otros tipos de interfaces como los opto acopladores. Para realizar un interfaz se deben saber todos los parámetros de la carga para así garantizar el correcto funcionamiento del circuito. Para este proyecto se escogió un transistor TIP122, de acuerdo con los parámetros de la bobina este transistor cumpliría con todos los requerimientos [39].

5.5.1 Transistor.

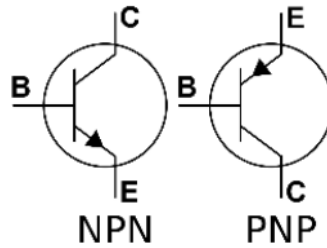
Figura 36. Transistor.



El Transistor es un componente electrónico formado por materiales semiconductores, de uso muy habitual, pues lo encontramos presente en cualquiera de los aparatos de uso cotidiano como las radios, alarmas, automóviles, ordenadores, etc. Los transistores vienen a sustituir a las antiguas válvulas termoiónicas de hace unas décadas. Gracias a ellos fue posible la construcción de receptores de radio portátiles llamados comúnmente "transistores", televisores que se encendían en un par de segundos, televisores en color, etc. Antes de aparecer los transistores, los aparatos a válvulas tenían que trabajar con tensiones bastante altas, tardaban más de 30 segundos en empezar a funcionar, y en ningún caso podían funcionar a pilas, debido al gran consumo que tenían.

Los transistores son unos elementos que han facilitado, en gran medida, el diseño de circuitos electrónicos de reducido tamaño, gran versatilidad y facilidad de control [39].

Figura 37. Diagrama interno transistor NPN y PNP.



Hoja de datos TIP122

Figura 38. Configuración interna TIP122.

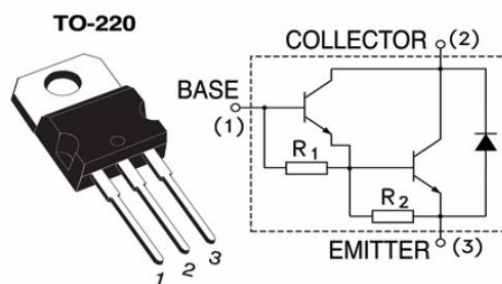
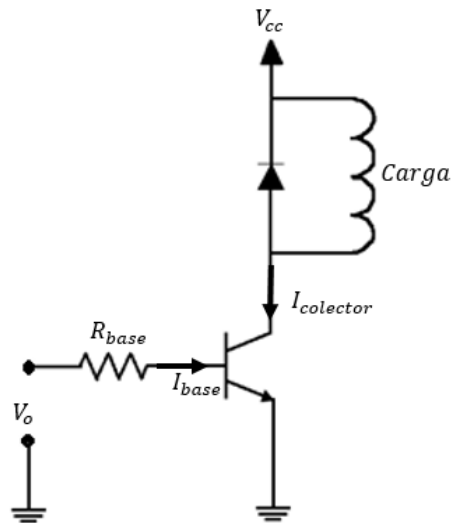


Figura 39. Rangos de operación del TIP122 a 25°C [40].

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Max.	Unit
$V_{CE(sus)}$	Collector-Emitter Sustaining Voltage	TIP120	60		V
		TIP121	80		
		TIP122	100		
I_{CEO}	Collector Cut-Off Current	TIP120		0.5	mA
		TIP121		0.5	
		TIP122		0.5	
I_{CBO}	Collector Cut-Off Current	TIP120		0.2	mA
		TIP121		0.2	
		TIP122		0.2	
I_{EBO}	Emitter Cut-Off Current	$V_{EB} = 5\text{ V}, I_C = 0$		2	mA
h_{FE}	DC Current Gain ⁽¹⁾	$V_{CE} = 3\text{ V}, I_C = 0.5\text{ A}$	1000		
		$V_{CE} = 3\text{ V}, I_C = 3\text{ A}$	1000		
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage ⁽¹⁾	$I_C = 3\text{ A}, I_B = 12\text{ mA}$		2.0	V
		$I_C = 5\text{ A}, I_B = 20\text{ mA}$		4.0	
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage ⁽¹⁾	$V_{CE} = 3\text{ V}, I_C = 3\text{ A}$		2.5	V
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CB} = 10\text{ V}, I_E = 0, f = 0.1\text{ MHz}$		200	pF

Debido a que el arduino maneja una tensión de 0 V a 5 V y una corriente de 40 mA, se hace necesario implementar un interfaz de potencia que permita el manejo de la bobina ya que esta será alimentada a 27 VDC y su máxima corriente es de 1,22 A.

Figura 40. Interfaz de potencia.



Para realizar la interfaz se debe calcular el valor de la resistencia base del transistor para limitar la corriente y evitar daños en los elementos de baja potencia. El valor de la corriente depende de la carga a manipular.

$$I_{colector} = I_{carga}$$

$$I_{base} = \frac{I_c}{h_{FE}}$$

$$R_{base} = \frac{V_o}{I_{base}}$$

De acuerdo con la adecuación realizada se tiene que:

$$\begin{aligned} V_{cc} &= 28 \text{ V} \\ I_{carga} &= 1,22 \text{ A} \\ h_{FE} &= 1000 \end{aligned}$$

Realizando los reemplazos, se obtiene:

$$R_{base} = 3,68 \text{ k}\Omega$$

5.6 Algoritmo realizado en arduino.

En esta parte se anexara el código diseñado, se explicara de manera clara y concisa cada segmento del programa realizado para controlar la posición del objeto.

Lo primero que se realizó fue definir las entradas y salidas de los pines del arduino, también se establecieron los parámetros necesarios para los retardos y poder calcular la potencia necesaria de la bobina para mantener el objeto en la posición deseada.

```
const int bobina=11,tx=13,rx=0;
int A = 2;
int B = 80;
int C = 20;
```

```
Int D = 1000;
int maxPower = 255;
long umbral= 300000;
int presencia = 0;
int monitoring = false;
```

```
void setup()
{
  pinMode(bobina, OUTPUT);
  pinMode(tx, OUTPUT);
  pinMode(rx, INPUT);
}
```

El siguiente segmento es el encargado de detectar si hay presencia del objeto, esto se realiza cada vez que el contador llega a 1000.

```
void loop()
{
  static int count = 0;
  static int oldPosition = 0;
  static int ambient = 0;
  static long powerCount = 0;
  count ++;
  if (count == 1000)
  {
    ambient = lectura_ambiente();
    count = 0;
    presencia = (powerCount < umbral);
    powerCount = 0;
  }
}
```


Para calcular la potencia de la bobina se hace necesario emplear la siguiente ecuación con la cual se controla el ancho del pulso para el PWM:

$$Potencia = \frac{Posición}{A} + Velocidad * B + C$$

Posición: será determinada por la cantidad de luz percibida por el sensor.

Velocidad: la velocidad se calcula realizando la resta entre la posición actual y la posición anterior.

$$Velocidad = \frac{Posición_{actual}}{t} - \frac{Posición_{anterior}}{t}$$

La posición se divide por A para que el rango de la salida pueda estar dentro del intervalo de la resolución de salida del PWM del arduino.

También se llevara a cabo la adecuación de la señal sensada apagando el sensor transmisor durante 100 µs para sensar la luz ambiente.

```
int raw = 1024 - analogRead(rx);
int position = raw - ambient;
int velocity = position - oldPosition;
int power = position / A + velocity * B + C;

powerCount += power;
oldPosition = position;

if (power > maxPower)
{
    power = maxPower;
}
if (power < 0)
{
    power = 0;
}

analogWrite(bobina, power * presencia);
delayMicroseconds(D);
}

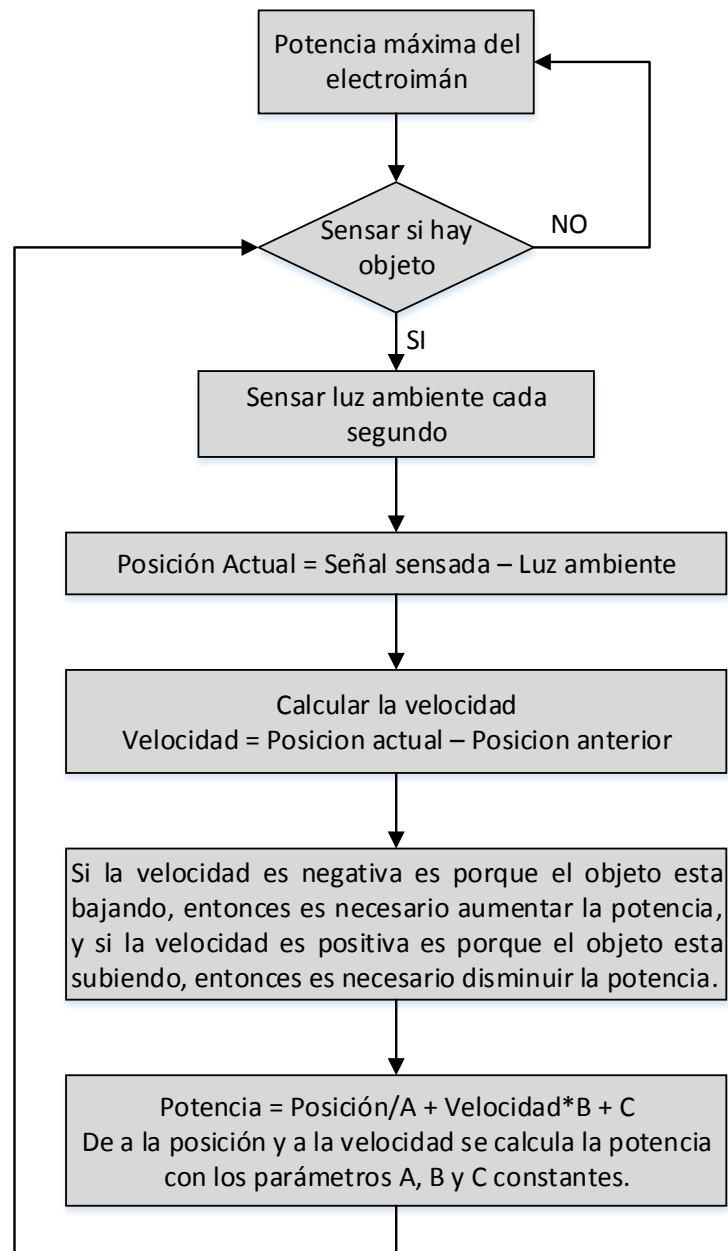
int lectura_ambiente()
{
    digitalWrite(tx, LOW);
    // allow time for LED and phototransistor to settle
```

```

delayMicroseconds(100);
int ambient = 1024 - analogRead(rx);
digitalWrite(tx, HIGH);
return ambient;
}

```

En el siguiente diagrama de flujo se puede observar de forma resumida el algoritmo descrito anteriormente.



6. CAPÍTULO 6. Pruebas y resultados.

En este capítulo se habla de las pruebas realizadas durante el diseño y montaje de la plataforma de levitación, se muestran los datos medidos del solenoide como su inductancia y resistencia; en la parte del sensado se grafican los datos de las señales adquiridas con sus respectivas adecuaciones, debido a la implementación del PWM se anexará de manera gráfica el comportamiento de la señal de salida del arduino.

6.1 Parámetros medidos de la bobina.

Para medir los parámetros intrínsecos del elemento pasivo utilizado en la plataforma de levitación se utilizó el instrumento de medición disponible en la facultad de eléctrica: el FLUKE PM6303A con el cual se pueden medir la resistencia, la inductancia y la capacitancia. Como bien se sabe, la inductancia se puede representar como un circuito RL.

FLUKE PM6303A

Figura 41. FLUKE PM6303A.



Características:

- Precisión: 0,25%.
- Frecuencia de prueba: 1 KHz.
- Capacidad capacitancia Max. min. 100 mF / 0.0 pF.
- Capacidad inductancia max. min. : 0,0 uH / 32 kHz.
- Flujo de resistencia máx. min. : 0,000 Ohm / 200 MΩ.
- Resolución: 0,1 pF / 0,1 uH / 0.1 mΩ.

Resultados obtenidos

Los parámetros medidos de la bobina, utilizando el instrumento de medición fluke son los siguientes:

$R = 262,1 \, \Omega$
 $L_{\text{serie}} = 70,51 \, \text{mH}$

Figura 42. Resistencia medida de la bobina a 1 kHz con el FLUKE PM6303A.



Figura 43. Inductancia medida a 1 kHz con el FLUKE PM6303A.

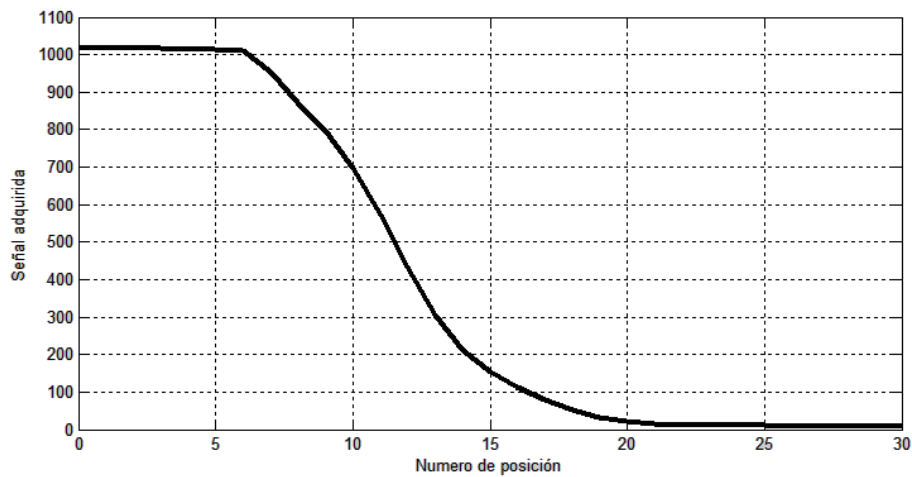


6.2 Datos obtenidos del sensado y la adecuación de los sensores.

De acuerdo con el diseño implementado de los sensores infrarrojos que se encuentra en el capítulo anterior, se utilizó el monitor serial del arduino para adquirir la señal analógica, almacenarla en forma gráfica y, así, caracterizarla para determinar su comportamiento.

Para determinar la posición del objeto se trabajó con la cantidad de luz percibida por el sensor infrarrojo SFH 2030, se utilizó una pieza plana con la cual se iba tapando parcialmente el sensor receptor, de forma tal que permitiera reducir la cantidad de luz sensada y así obtener la variación en la resolución de acuerdo a la posición de la pieza. Los datos obtenidos se ilustran en la siguiente figura.

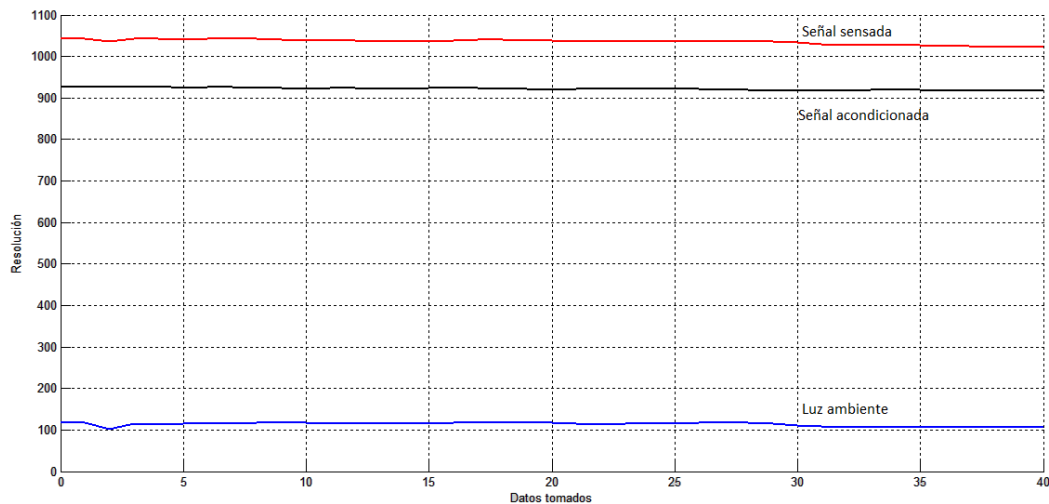
Figura 44. Posición Vs Resolución.



Ya que en el entorno existen señales indeseadas las cuales pueden afectar el correcto funcionamiento del sistema de control hasta volverlo inestable, fue necesario sensar las perturbaciones provocadas por la luz ambiente que se encuentra en el entorno de la plataforma.

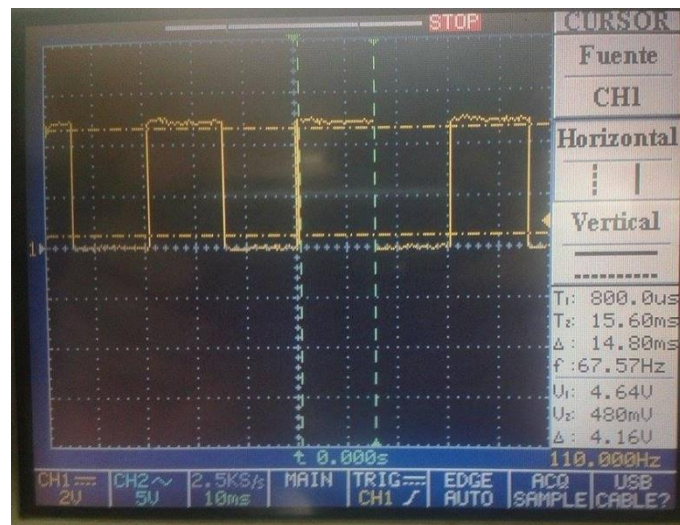
En la siguiente figura se muestra cómo se llevó a cabo la adecuación del sensado para tener en cuenta las perturbaciones del medio, para esto, se senso la cantidad de luz transmitida por el emisor, después se senso la cantidad de luz captada en el entorno de la plataforma, deshabilitando el sensor transmisor de luz infrarroja y luego se restaron estas señales para obtener la señal deseada, teniendo en cuenta las perturbaciones en el medio.

Figura 45. Adecuación del sensado.



Después de obtener los datos de la adecuación del sensor, se procedió a verificar la salida del controlador para observar el comportamiento del PWM al hacer levitar el imán. Esta salida se observó utilizando el osciloscopio, ya que este sirve para registrar las oscilaciones de las ondas y se pueden observar en una pantalla. Como era de esperarse, se muestra una onda con un ciclo útil del 50 %, debido a que el imán se encuentra en equilibrio y la oscilación es pequeña.

Figura 46. Señal de salida PWM.



En las siguientes figuras se observa el aspecto final de la plataforma de levitación y la ubicación de cada una de las partes que lo componen. Como se especificó en el capítulo 4 se utilizó el acrílico por sus propiedades no magnéticas y su resistencia mecánica, se ubicó el electroimán en la parte superior de la plataforma, ya que el sistema de levitación es por atracción, y los sensores infrarrojos en las paredes laterales.

Figura 47. Sistema de levitación implementado.

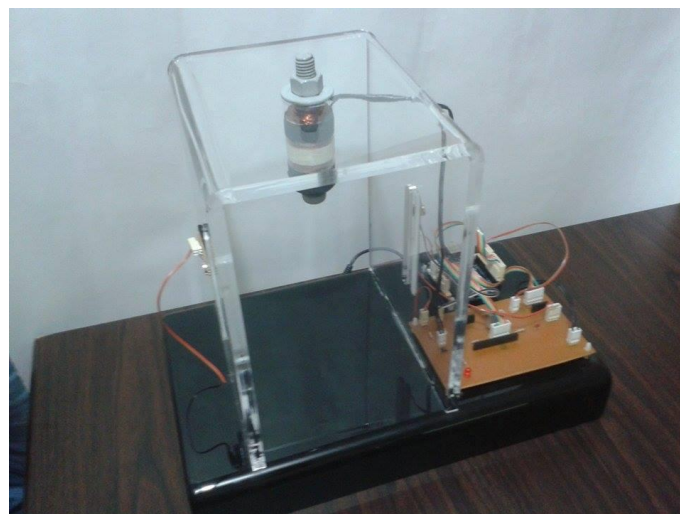


Figura 48. Plataforma de levitación en funcionamiento.

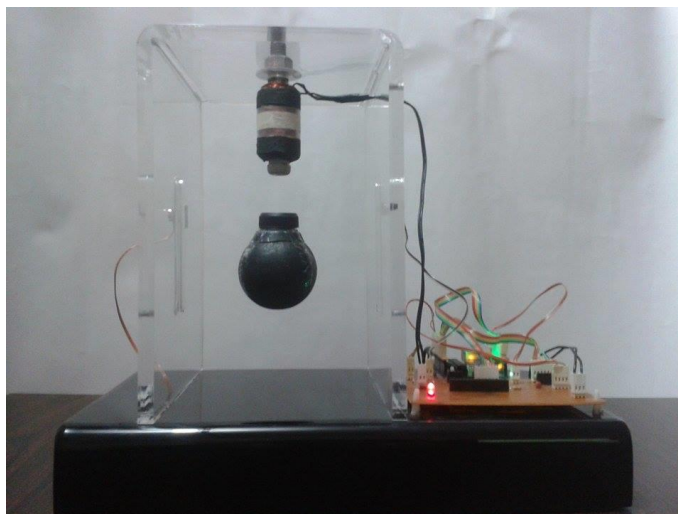


Figura 49. Distancia entre el objeto levitando y la bobina.



En la figura anterior se puede observar la distancia máxima de levitación que hay entre el electroimán y el objeto, obteniendo así el punto de equilibrio.

7. CONCLUSIONES

- A la hora de realizar una plataforma de levitación magnética es necesario seleccionar materiales que no interactúen con el campo magnético generado por la bobina, por ende se deben escoger materiales no magnetizables y que tengan buena resistencia mecánica para soportar las piezas.
- Es difícil lograr la levitación magnética de un objeto sin la implementación de un sistema de control ya que es un sistema altamente inestable y no lineal, además, sin la ayuda de los sensores es más complejo debido que no se puede detectar la presencia y la posición del objeto.
- Escoger el tipo de sensores y realizar la debida adecuación del sensado, es una de las partes fundamentales del proyecto, ya que de allí depende la correcta lectura de la posición y la eliminación de las perturbaciones, además se hace necesaria la implementación de un sistema de control lazo cerrado, el cual estará monitoreando a cada momento el comportamiento y el funcionamiento de la plataforma.
- El sistema de levitación implementado nos da la posibilidad de probar otros tipos de controladores más estables, ya que el control implementado con el arduino uno solo nos brinda un grado de libertad.
- Debido a los avances tecnológicos y a la automatización de las grandes industrias, se observa que los sistemas de control se están convirtiendo en sistemas de uso diario, porque estos controles nos brindan más seguridad y permiten realizar cualquier proceso con mayor eficiencia en cuanto a tiempo y calidad. Se puede decir que los sistemas de control son una parte indispensable para realizar cualquier proyecto que no requiera intervención de personas.

8. TRABAJOS FUTUROS

Dado un primer desarrollo de un sistema de levitación, son muchas las mejoras que se le pueden hacer al sistema. Dentro del marco de la teoría de control se pueden implementar controladores no lineales, control por redes neuronales, o emplear lógica difusa para ajustar de manera automática las constantes de un PID que permitan la mejor respuesta del sistema, entre otros métodos. Todo esto para comprobar su utilidad real en un sistema tan altamente no lineal e inestable como el que se trabajó en la tesis.

A nivel de ingeniería se puede mezclar el concepto de levitador magnético de un grado de libertad con el concepto de motor lineal. De la unión de estos dos se puede desarrollar un levitador magnético de dos o tres dimensiones, pudiendo aplicarse a sistemas de transporte. En principio, mediante el empleo de guías magnéticas (para evitar el movimiento de vaivén observado cuando el objeto no se ubica exactamente en la posición de referencia) y sensores adicionales de flujo electromagnético y acelerómetros se podría planear un proyecto con futuro, pues el principio básico ya fue implementado y se demostró con éxito su viabilidad en el presente trabajo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Peijnenburg A., Vermeulen J., and Eijk J., van. Magnetic levitation systems compared to conventional bearing systems. *Microelectronic Engineering ELSE-VIER*, 83:1372–1375, 2006
- [2] Weilert M. A., Whitaker D. L., Maris H. J., and Seidel G. M. Magnetic levitation of helium liquid. *Low temperature physics*, 106:50–58, 1997.
- [3] Sun L., Zhao K., and Kou B. An electromagnetic launcher with magnetic levitation realized based on vector control. *IEEE transactions on magnetics*, 45:467–470, 2009.
- [4] Samiappan C., Mirnateghi N., and Paden B. Maglev apparatus for power minimization and control of artificial hearts. *IEEE transaction on control system technology*, 16:13–18, 2008.
- [5] Li-mei W., Fu-ying J., and Chun-fang L. Sliding mode control of cnc electromagnetic levitation system based on feedback linearization. In *Chinese control and decision conference*, 2009.
- [6] Berkelman P. and Dzadovsky M. Extending the motion ranges of magnetic levitation for haptic interaction. In *Third joint eurohaptics conference and symposium on haptic interfaces*, 2009.
- [7] SHIAO Ying-shing. Design and implementation of a controller for a magnetic levitation system. *Proc. Natl. Sci. Conc. ROC(D)*, 11:88–94, 2001.
- [8] Huachun W. and Yefa H. Study on fuzzy control algorithm for magnetic levitated platform. In *International conference on measuring technology and mechatronics automation*, 2009.
- [9] Lilienkamnp katie and Lundberg K. Low-cost magnetic levitation project kits for teaching feedback system design. In *American control conference*, 2004.
- [10] Shafayet Hossain. Design of a robust controller for a magnetic levitation system. *Wichita State University*, 2007.
- [11] Palmieri D. and M. Pucci. Construcción de un sistema de levitación magnética para laboratorio controlado por pc en tiempo real. Technical report, *Universidad Nacional de Quilmes*, 2004.
- [12] G. Michel A., Lempel and Carbajales R. Levitador magnético. Technical report, *Universidad de buenos aires*, 2004.

- [13] Campos R., Lopes R., Milhan A., Harrop R., and Della B. Predictive control of a magnetic levitation system with explicit treatment of operational constraints. ABCM Symposium series in mechatronics, 2:1–8, 2006.
- [14] Abusleme A. and Cipriano A. Experiencia de levitación magnética de bajo costo para laboratorio de control automático. Technical report, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001.
- [15] Guillermo E., Larriva J., and Trelles J. Control de un levitador magnético. Technical report, Ecuador, 2003.
- [16] Espinosa U., Aceves A., Vega A., and Carbajal C. Sistema de levitación magnética controlado con lógica difusa. Technical report, ITESM Campus Estado de México, 2003.
- [17] Panuncio Cruz Francisco. Control de un sistema de levitación magnética con compensación de redes neuronales. Master's thesis, Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politécnico nacional, 2009.
- [18] Namerikawa T. and Fujita M. H control system design of the magnetic suspension system considering initial state uncertainties. IEEJ Trans. EIS, 123: 1094–1100, 2003.
- [19] Trisant A., Yasser M., Lu J., and Yahagi T. Implementation of a fuzzy pid controller using neural network on the magnetic levitation system. In International symposium on intelligent signal processing and communication systems, 2006.
- [20] Hurley W., G. Electromagnetic design of a magnetic suspension system. IEEE Transactions on education, 40:30–35, 1997.
- [21] Margaret Glavin. State space control of a magnetic suspension system. Master's thesis, National university of Ireland, 2005.
- [22] Nataraj P. and Patil M. Robust control design for nonlinear magnetic levitation system using quantitative feedback theory (qft). Technical report, Indian Institute of technology Bombay, Mumbai india, 2008.
- [23] Banerjee S., Bhaduri R., and Prasad D. A practical study on the dynamic performance of a controller for an electromagnetic levitation system. In 2nd IEEE International conference on power and energy, 2008.
- [24] Baranowski J. and Piatek P. Nonlinear dynamical feedback for motion control of magnetic levitation system. In International power electronics and motion control conference, 2008.

- [25] Lee T., Su J., and Yu K. Implementation of the state feedback control scheme for a magnetic levitation system. In Second IEEE conference on industrial electronics and applications, 2007.
- [26] Yu G. and Huang Y. T-s fuzzy control of a magnetic levitation systems using qea. In Fourth International Conference on innovative computing, information and control, 2009.
- [27] Dragos C., Preitl S., Precup R., Pozna C., and Tar J. Takagi-sugeno fuzzy controller for a magnetic levitation system laboratory equipment. In IEEE international joint conferences on computational cybernetics and technical informatics, 2010.
- [28] Aliasghary M., Aliyari M., Jalilvand A., and Teshnehlab M. Magnetic levitation control based-on neural network and feedback error learning approach. In Second IEEE International Conference on power and energy, 2008.
- [29] Levitación magnética, alternativa para el transporte de pasajeros. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Disponible en: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/maglev/Index.htm>.
- [30] Larousse Editorial, S.L. Ferromagnetismo. The Free Dictionary. [En línea] [Citado el: 27 de Marzo de 2013.] <http://es.thefreedictionary.com/ferromagnetismo>.
- [31] Nieto, Manuel y Ortiz, Victor. Control algebraico para un sistema de levitacion magnetica usando estimacion de parametros en tiempo real implementado en un procesador digital de senales (DSP)
- [32] Rocha Núñez, José Manuel y Lara, Elizabeth. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN. Programa de ingeniería eléctrica y mecánica. <http://gama.fime.uanl.mx/~agarcia/materias/ingco/apclas/01%20/%20Introduccion%20a%20los%20Sistemas%20de%20Control.pdf>
- [33] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3330/5/34059-5.pdf>
- [34] PROYECTOS ELECTRÓNICOS. Sensores infrarrojos emisor y receptor. <http://catorcepi.wikispaces.com/file/view/3678453-SENSOR-INFRRARROJO-Teoria-y-practica.pdf>
- [35] HOJA DE DATOS SENSOR IR333-A. http://www.adafruit.com/datasheets/IR333_A_datasheet.pdf

- [36] HOJA DE DATOS SENSOR SFH2030.
http://svn.clifford.at/metaparts/trunk/datasheets/DS_f8807f6642fbada1fde46817f0882124.pdf
- [37] PÁGINA OFICIAL ARDUINO. <http://www.arduino.cc/>
- [38] Sanchez, José Norbey. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.
<http://blog.utp.edu.co/jnsanchez/>
- [39] Donate, Antonio Hermosa. 1997. *Técnicas electronicas digitales*. Barcelona : Vanguard Grafic, 1997.
- [40] Hoja de datos transistor TIP122.
<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/TI/TIP120.pdf>
- [41] Monica Vianey Hernández Victoria, Fisica II.
<https://monnyblogdotcom.wordpress.com/about/>
- [42] INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL. CITEDI.
<http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/3792/1/CONSTRUCCYCONTROL.pdf>